



AGROCAMPUS OUEST
CFR de Rennes

CIRAD-PERSYST UPR 26
« *Systèmes de culture bananiers plantains ananas* »

Mémoire de Fin d'Études

**Master de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques,
Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage**

Année universitaire : 2011-2012

Master 2 Biologie Végétale Intégrative : Gène, Plante, Agrosystème

Systèmes de Productions Végétales Raisonnés option Agrosystème

**Influence de l'irrigation et de la fertilisation sur la croissance et le développement
végétatifs de l'ananas Victoria à La Réunion et modélisation du bilan hydrique
associé**

Marie Rothé



Composition du jury :

Elodie Dorey
Patrick Fournier
Philippe Leterme
Safya Menasseri
Christine Bissuel
Dominique Poulain

Maître de stage
Maître de stage
Enseignant responsable
Examineur
Examineur
Examineur

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier toute l'équipe pédagogique du parcours Systèmes de Productions Végétales Raisonnées de la formation BioVIGPA de l'Agrocampus-Ouest de Rennes, pour la confiance dont ils ont fait preuve en m'intégrant à leur formation ainsi que pour leurs enseignements.

Je remercie particulièrement Philippe Leterme, responsable de la formation, d'avoir accepté d'être mon enseignant responsable pour l'encadrement de ce stage.

Je tiens à remercier Elodie Dorey, Patrick Fournier et Philippe Tixier pour m'avoir intégré à leur équipe, pour leur aide et leur encadrement tout au long du stage.

Je tiens à remercier également Georget Tullus, Bernard Abufera et Marie Darnaudery qui m'ont permis de mener à bien les expérimentations parfois longues ainsi que Mr Payet pour son aide matérielle.

Matthieu Lechaudel, Frédéric Normand, Pierre Todorov et Thierry Michels pour leurs conseils.

Enfin, je tiens à remercier Philippe Cao-Van et toute l'équipe de la station du CIRAD à Bassin-Plat pour leur accueil, aux coté de qui ça a été un plaisir de travailler pendant ces 6 mois.

Liste des abréviations :

CAM : Crassulacean Acid Metabolism

CIRAD : Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement

Eb : Efficience biologique d'utilisation du rayonnement capté par la culture

ET₀ : évapotranspiration de référence.

ETM : évapotranspiration maximale d'une culture

ETR : évapotranspiration réelle d'une culture

HSD : Honestly significant difference

JAP : Jours Après Plantation

Kc : Coefficient cultural

Kcb : Coefficient cultural biologique

Ke : Coefficient d'évaporation

Ks : Coefficient de stress hydrique

LAI : Leaf Area Index

PARi : Part de rayonnement incident intercepté par le couvert végétal

PdsJAP : Poids par nombre de jour après plantation

RFU : Réserve Facilement Utilisable

RU : Réserve Utile

U : Unité en kg/ha/an

Zr : Zone d'exploration Racinaire

Annexes

Annexe I Calendrier et doses de fertilisation pour les conditions 150 U et 300 U de l'essai fertilisation	2
Annexe II Extrait des données d'entrée nécessaires au fonctionnement du module de bilan hydrique	3
Annexe III Module de bilan hydrique tel qu'il est construit avec le logiciel Stella.....	4
Annexe IV Représentation du module de stress hydrique par le logiciel Stella	5
Annexe V Représentation de l'influence du stress hydrique sur le module de croissance réalisé avec Stella.....	6
Annexe VI Module de croissance par plant avec intervention de la variable TE modif	7
Annexe VII Module permettant de comparer les données issues des relevés des cannes tensiométriques au champ et de celle prédite par le modèle pour une profondeur de sol fixée à 30cm	8
Annexe VIII Exemples de traitement statistique des données avec R.....	9

Contenu

I.	Introduction.....	- 1 -
1.	Biologie de l'ananas	- 1 -
2.	Production d'ananas à la Réunion	- 2 -
a)	Sols de La Réunion.....	- 3 -
b)	Climat de la Réunion	- 5 -
3.	Facteurs affectant l'élaboration du rendement	- 6 -
a)	Facteurs climatiques	- 6 -
b)	Pratiques culturales.....	- 7 -
4.	Objectifs de l'étude	- 8 -
II.	Matériels et Méthodes	- 8 -
1.	Protocole expérimental.....	- 8 -
2.	Mesures	- 10 -
3.	Analyses statistiques	- 11 -
III.	Résultats	- 11 -
1.	Croissance	- 11 -
a)	Biomasse végétative	- 11 -
b)	Croissance racinaire.....	- 15 -
2.	Teneur en eau	- 15 -
3.	Développement.....	- 18 -
4.	Suivi du potentiel de pression du sol.....	- 19 -
IV.	Modélisation du bilan hydrique et paramètres associés	- 20 -
1.	Détermination du besoin en eau de la culture et dynamique des flux.....	- 20 -
2.	Modèle.....	- 24 -
a)	Paramètre de RU et RFU (réservoir)	- 25 -
b)	Paramètre des précipitations et de l'irrigation (entrées).....	- 26 -
c)	Evapotranspiration (sorties).....	- 27 -

d) Coefficient de stress hydrique : K_s	- 28 -
3. Calibration.....	- 29 -
V. Discussion	- 33 -
VI. Conclusion.....	- 37 -
Bibliographie	- 38 -

I. Introduction

D'abord situés à Hawaï (en 1960, Hawaï produisait 70% de la consommation mondiale (Collins, 1960), les pôles de production de l'ananas se sont étendus à toutes les zones intertropicales chaudes et humides. Depuis 1988, sous l'impulsion de la demande à l'exportation, l'ananas 'Queen Victoria' s'est fortement développé à la Réunion. Son fruit est considéré comme un des meilleurs ananas au monde, et se consomme en grande majorité frais. C'est la culture fruitière la plus importante sur l'île en termes de valeur et de tonnages exportés avec occupation de plus de 400 hectares. L'importance socio-économique de la filière ananas est donc majeure avec plusieurs milliers d'emplois directs et indirects.

La culture d'ananas est fortement artificialisée, elle consomme de fortes doses d'intrants et nécessite, dans la plupart de cas, un travail du sol important. La plupart des études menées jusqu'alors avaient pour objectif de mieux connaître et maîtriser le cycle de la plante et d'améliorer le rendement mais les chercheurs s'intéressent désormais de plus en plus à la durabilité des systèmes de cultures afin de produire des fruits de qualité tout en respectant l'environnement.

Ce travail de stage porte sur l'étude de l'influence des pratiques culturales, irrigation et fertilisation, sur la croissance et le développement de l'ananas Victoria à la Réunion ainsi que sur la modélisation du bilan hydrique associé. Il s'intègre dans un travail de thèse qui a pour objectif de construire un modèle d'élaboration du rendement et de la qualité de l'ananas 'Queen Victoria' à la Réunion couplé à un module décisionnel simulant les règles de décisions des agriculteurs afin de concevoir des prototypes de systèmes de culture durables dans les conditions pédoclimatiques contrastées de la Réunion.

1. Biologie de l'ananas

L'ananas, *Ananas comosus* (L.) Merr est une monocotylédone herbacée appartenant à la famille des Broméliacées. Elle se multiplie naturellement après la production du fruit par reproduction végétative à partir du méristème terminal (donnant naissance à la couronne) ou encore à partir des bourgeons axillaires (qui forment des rejets latéraux sur la tige et le pédoncule). L'ananas possède un mécanisme crassulacéen, c'est une plante en CAM (Crassulacean Acid Metabolism) qui a gardé certaines caractéristiques des Broméliacées concernant essentiellement l'économie de l'eau. Pour absorber et stocker l'eau, les plants montrent des capacités particulières. Tout d'abord, l'organisation spatiale des feuilles, disposées en rosette et en forme de gouttière permet une récupération maximale des précipitations. Cette eau est absorbable par les racines adventives qui se trouvent à la base des vieilles feuilles et par l'épiderme de la zone non chlorophyllienne de la feuille. Ensuite, la présence d'un tissu aquifère dans les feuilles (dont le volume varie avec les conditions hydriques (Nightingale, 1936) peut jouer également un rôle dans l'économie de l'eau. L'efficacité d'utilisation de l'eau (CO_2 fixé par unité d'eau perdue) des plantes en CAM est 3 fois supérieure à celle des plantes C4 et 6 fois supérieure à celle des C3 (Carr, 2012).

Des trichomes situés sur l'épiderme inférieur donnent la couleur argentée aux feuilles et jouent un rôle dans l'absorption des solutions de la base des feuilles, eau et éléments nutritifs dissous. Quand l'épiderme est sec, les trichomes sont érigées, mais si la feuille est humectée, ils sont aplatis engendrant l'obstruction des stomates, avec un arrêt des échanges gazeux et de vapeur la nuit suivant une pluie. Ce mécanisme reste cependant minoritaire par rapport à la résistance stomatique.

L'anatomie des stomates de l'ananas fait que la plante transpire très peu. Les stomates sont sur la face inférieure seulement au fond des sillons, avec une densité faible (80/mm²) et une dimension modeste permettant une ouverture de 0 à 30μ (Py et al., 1984).

En routine, les racines mesurent plutôt entre 30 et 40cm chez le 'Queen Victoria' en fin de cycle végétatif. Ces facteurs confèrent à l'ananas une bonne adaptation à la sécheresse en termes de survie. En cas de déficit hydrique, l'ananas voit sa consommation en eau ainsi que sa photosynthèse diminuer par rapport aux cycles en C3 et C4.

Lors de la croissance végétative (de la plantation à l'induction florale), la croissance du plant entier résulte de la croissance des feuilles, de la tige, et des racines et aboutit à la mise en place des organes floraux puis de la couronne. La part des feuilles représente environ 90 % de la masse fraîche du plant sans racine jusqu'au TIF (Py, 1959). Le TIF, Traitement d'Induction Florale, permet à l'agriculteur de choisir le moment de la floraison afin de regrouper la récolte des fruits au sein d'une parcelle. Le poids du plant au TIF, bon estimateur de la surface foliaire, est directement corrélé au poids du fruit à la récolte (Malézieux, 1988). La maîtrise de la floraison pour le planteur joue un rôle central dans la planification de la production. Elle lui permet de choisir précisément la durée de ses cycles en vue d'obtenir des fruits du calibre souhaité à une époque déterminée. La floraison est naturellement induite par de basses températures, des jours courts et une nébulosité importante mais engendre une trop grande variabilité de temps de récolte au sein d'une parcelle. Les plants réagiront d'autant plus facilement à ces facteurs que leur croissance sera faible (sol mal préparé, plants parasités, sécheresse). On induit artificiellement la floraison à l'aide d'Ethrel concentré spécial ananas (Etéphon) appliqué de jour en pulvérisation sur le feuillage. Selon l'altitude et la saison, les inflorescences apparaissent 4 à 8 semaines après le TIF.

2. Production d'ananas à la Réunion

L'ananas est cultivé à La Réunion de manière intensive, presque toujours sur paillage polyéthylène, avec des densités de plantation variables de 60 à 100 000 plants par hectare. L'ananas est actuellement produit à La Réunion selon un itinéraire technique standard tiré du recueil des bonnes pratiques édité par le CIRAD qui tient compte des besoins réels de la plante (Bartholomew et al., 2003). On fournit à la plante 300 unités d'azote et 450 unités de potassium fractionnés en 7 apports. Toutefois certaines enquêtes récentes (Brunet, 2007 ; Nassibou, 2007 ; Gouache, 2005) montrent que les pratiques utilisées réellement divergent des recommandations techniques.

Une des particularités de la production à la Réunion est qu'elle prend place dans des zones très contrastées de l'île (fig.1), avec une large gamme de sols, de température, pluviométrie et de rayonnement solaire. Ces conditions modifient le fonctionnement de la plante et son cycle de production peut varier quasiment du simple au double impliquant donc des pratiques culturales variables. Même si elle n'est pas systématiquement pratiquée, l'irrigation en période sèche est indispensable dans certaines zones de l'île. Les besoins en eau restent cependant aujourd'hui mal connus, on les estime à 50 ou 100mm par mois et les conséquences d'un manque d'eau sur la croissance végétative ou sur le fruit restent peu étudiées (Carr, 2012). Afin de rentrer dans une démarche de durabilité des systèmes agricoles et donc d'assurer un rendement économiquement viable tout en conservant la qualité des fruits, il est essentiel de gérer au mieux l'alimentation hydrique de la plante.

Les plantations de nouvelles parcelles d'ananas et les récoltes ont lieu toute l'année. Chaque parcelle ou presque bénéficie donc de conditions de croissance différentes avec une variabilité qui n'est pas seulement interannuelle mais bien permanente. La gestion de l'itinéraire technique selon la saison et le lieu de production est donc différente.

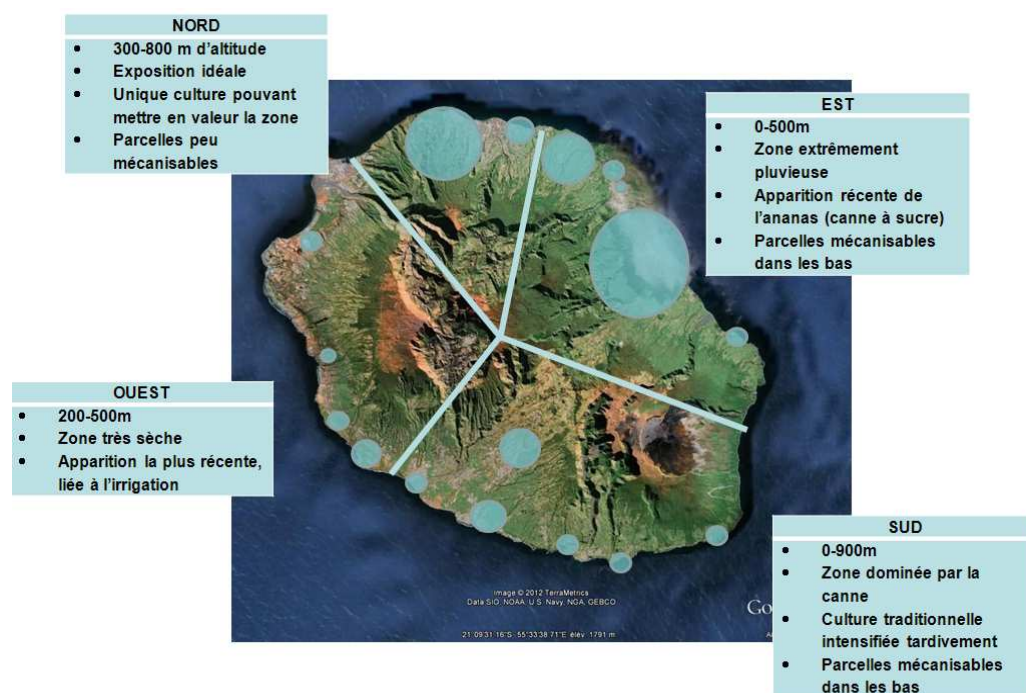


Figure 1 Carte des différentes zones de culture d'ananas et leurs caractéristiques agronomiques sur l'île de La Réunion

a) Sols de La Réunion

La Réunion est une île volcanique avec le Piton des Neiges, éteint, et le piton de la Fournaise toujours en activité. La répartition des différents types de sol constituant l'île est

fonction de l'âge des coulées de lave les constituant ainsi que des conditions climatiques locales et de la végétation en place, y compris les surfaces agricoles, qui modulent les phénomènes d'érosion.

Parmi les grands types de sols, 6 classes se distinguent (fig.2) : les andosols et les andosols perhydratés qui sont des sols jeunes issus de cendres récentes et peu transformés car sous climat frais et humide. Les sols bruns andiques sont des andosols ayant évolué sous climat plus sec vers une transformation en sols bruns et bruns ferralitiques plus anciens issus de coulées anciennes sous climat plus sec (Raunet, 1991).

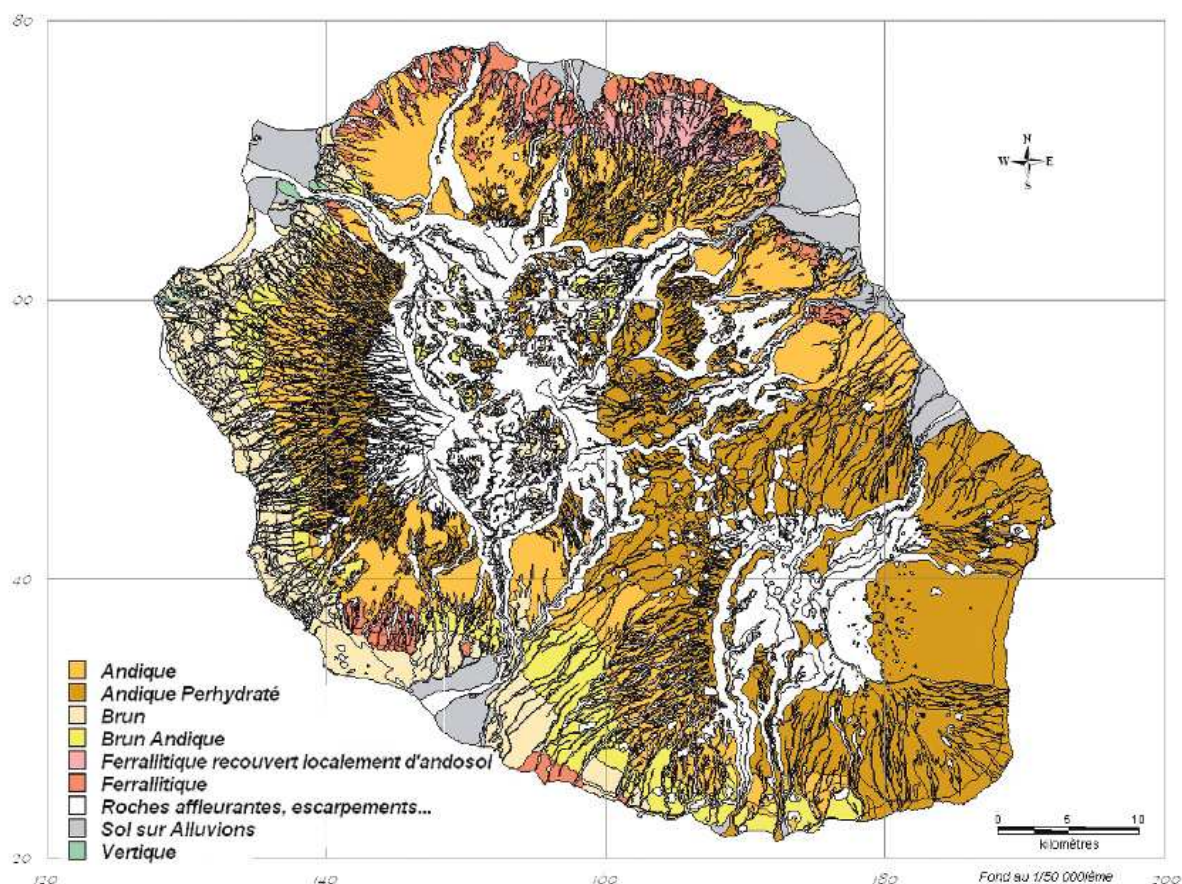


Figure 2 Carte des différents types de sol de La Réunion (Raunet, 1991)

Ces sols présentent une texture fine argilo-limoneuse à argileuse, ils sont très poreux avec une densité apparente faible allant de 1 à 1,3 et la plupart du temps peu profonds (1m). La réserve utile est élevée allant de 80 à 130mm sur 60cm. Ils ont en général une bonne fertilité chimique (fig.3) (Chabalier et al., 2006). Les sols vertiques sont eux peu propices aux cultures car composés d'argiles gonflantes.

Fertilité	Faible → Moyenne → Forte				
Azote	Andique Andique perhydraté		Brun andique Ferrallitique		Brun Vertique
Phosphore	Brun andique	Andique Andique perhydraté		Vertique	Brun Ferrallitique
Potassium	Andique perhydraté	Vertique	Andique	Ferrallitique Brun	Brun andique
Acidité	Très acide → moyennement acide → légèrement acide à neutre				
Sol	Andique	Ferrallitique	Andique perhydraté	Brun andique	Brun Vertique

Figure 3 Classification des différents types de sol en fonction de la fertilité et de l'acidité (P.-F. Chabalier, 2006).

b) Climat de la Réunion

L'île est très contrastée au niveau climatique. Elle est divisée en deux grandes parties, une façade Est « au vent » et une façade Ouest « sous le vent ». La côte sous le vent connaît une période sèche marquée de mai à novembre avec des précipitations mensuelles pouvant descendre en dessous de 50mm (fig.4 à gauche). La façade Est quant à elle connaît un régime pluviométrique élevé tout au long de l'année sans mois sec avec seulement un ralentissement des précipitations pendant 2 mois lors de la saison « sèche ». Comme nous l'avons décrit dans la première partie, le rayonnement et le régime pluviométrique varient spatialement avec un gradient est-ouest et des variations dues aux multiples reliefs (fig.4 à droite).

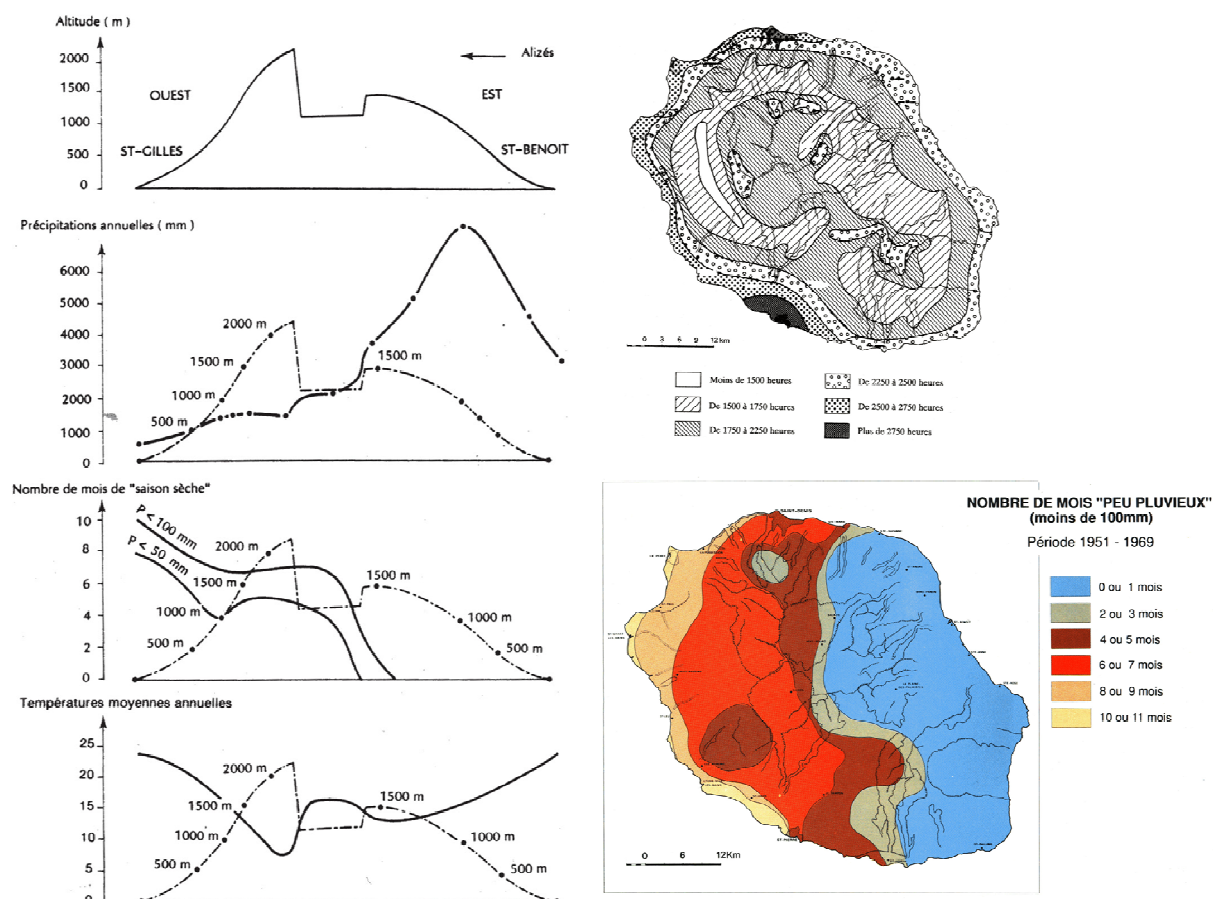


Figure 4 A gauche : Coupe schématique de l'île d'ouest en est avec de haut en bas : l'altitude, les précipitations annuelles, le nombre de mois de saison sèche et les températures moyennes annuelles. A droite : Cartographie du nombre d'heures d'ensoleillement (en haut) et de la pluviométrie annuelle (en bas) (M. Raunet, 1991).

3. Facteurs affectant l'élaboration du rendement

a) Facteurs climatiques

L'alimentation en eau

L'alimentation hydrique joue un rôle crucial dans le cycle de l'ananas. En effet, malgré son adaptation à la sécheresse, l'ananas réduit sa croissance lors d'un stress hydrique. Pendant la phase végétative, si l'alimentation en eau est insuffisante, on observe une croissance et un rythme d'émission foliaire plus faible (Py et al., 1984). Les stomates se ferment le jour, puis la nuit lorsque le stress augmente, ce qui réduit l'absorption de CO₂. Des chercheurs ont observé une réduction de croissance de l'ensemble des organes de la plante en phase de fructification lors d'une expérimentation en pots où ils faisaient varier la fréquence d'alimentation hydrique, l'indice de récolte et la surface foliaire ont été affectés (Chapman et al., 1983).

Le rayonnement solaire

L'interception du rayonnement solaire par une culture joue un grand rôle dans les variations de production. En conditions d'alimentation hydrique et minérale non limitantes, il y a une relation linéaire entre la matière sèche totale accumulée par le couvert végétal et la quantité d'énergie interceptée (Monteith, 1972).

Chez l'ananas, Sidéris et collaborateurs (Sidéris et al., 1936) observent à Hawaï une diminution du rendement lorsque le rayonnement est réduit. De même, Nose a pu montrer que l'augmentation de l'intensité lumineuse se traduit par une augmentation de l'absorption de CO₂ en fonctionnement crassulacéen, ce qui conduit à une production supérieure de matière sèche (Nose et al., 1977).

La température

D'après des expériences de Shiroma, le nombre de feuilles apparues en un mois est lié à la température moyenne mensuelle (Shiroma, 1972). Il a également été montré que la production de matière sèche en phase végétative dépendait de la thermopériode (Bartholomew & Kadzimin, 1977).

La température ne joue pas uniquement un rôle dans l'émission foliaire mais se concentre aussi sur les composantes physico-chimiques des fruits : la température augmente le taux de sucre de la pulpe (Collins, 1960) et diminue l'acidité du fruit (Teisson, 1979). On note également que le nombre de fruits tachés (taches noires) est en relation étroite avec l'indice pluvio-thermométrique ($IPT = \text{pluviométrie en mm} / \text{température moyenne } ^\circ\text{C au cours de la phase TIF-récolte}$).

b) Pratiques culturales

Les intrants minéraux

Afin de maximiser leur rendement, les producteurs d'ananas ont recours à des fertilisants chimiques tels que l'azote et le potassium avec des doses très élevées.

L'azote détermine la vitesse de croissance et donc le poids du plant et le poids du fruit. Lors de la phase végétative, les besoins en azote augmentent au cours de la croissance mais stagnent à partir de l'induction florale (Lacoeuilhe, 1973). Un apport trop tardif d'azote risque de diminuer la réponse de la plante aux traitements d'induction florale mais une trop forte nutrition azotée induirait une élongation excessive du pédoncule (Lacoeuilhe, La fumure N-K de l'ananas en Côte-d'Ivoire, 1978) et une diminution de la teneur en sucres et de l'acidité titrable de la pulpe du fruit (Py et al., 1957). Un raccourcissement du cycle par une forte fertilisation, ne permet pas d'atteindre un bon remplissage du fruit.

Le potassium détermine la qualité du fruit : teneur en sucres, acidité, saveur. C'est le niveau de la nutrition potassique à l'approche de l'induction florale qui a le plus d'incidence sur la qualité du fruit. Un excès d'azote, allié à un rapport K/N trop faible (<1) entraîne une

coloration de fruit plus difficile, favorise les taches noires et diminue l'aptitude à la conservation.

L'irrigation

Comme nous avons pu le voir dans le paragraphe précédent concernant le rôle des facteurs climatiques sur l'élaboration du rendement, l'alimentation hydrique d'une parcelle d'ananas doit être rigoureusement suivie. En cas de pluviométrie insuffisante, il est possible de réguler cet apport d'eau en pilotant manuellement l'irrigation. En période sèche et dans certaines zones de l'île, on ne peut envisager la culture intensive de l'ananas qu'avec irrigation.

4. Objectifs de l'étude

Les expérimentations menées par le CIRAD sur la station de Bassin plat à St Pierre (Réunion) visent à étudier le comportement d'une culture d'ananas sous différents régimes hydriques et azotés afin de déterminer au plus près les besoins réels de la plante en irrigation et fertilisation.

L'objectif de ce stage consiste à : (i) suivre l'étude du développement et de la croissance de l'ananas Victoria pendant le cycle végétatif sous 2 modalités d'irrigation et 3 modalités de fertilisation et (ii) concevoir un module de bilan hydrique calibré à l'aide des données expérimentales acquises au cours du stage pour ensuite le coupler au module de croissance déjà existant. Le rapport sera présenté en deux parties. La première partie traitera des essais irrigation et fertilisation mis en place avec détails des analyses effectuées et résultats. La deuxième partie sera consacrée à la description de l'élaboration du module de bilan hydrique associé au modèle de croissance de l'ananas Victoria en place actuellement ainsi qu'à l'explication des étapes de sa calibration et les résultats de simulation des courbes de croissances obtenues.

II. Matériels et Méthodes

1. Protocole expérimental

Une parcelle expérimentale a été mise en place sur la station du CIRAD à Bassin-Plat, comprenant deux expérimentations : irrigation et fertilisation.

La plantation d'ananas 'Queen Victoria' (*Ananas comosus* (L.) Merr) a eu lieu le 30/09/2011 avec une densité de plantation de 88 000 plants par hectare. Pour ce faire, les plants ont été disposés en 4 lignes par billon, les plants étant espacés de 25cm sur la ligne et l'entraxe des billons de 180 cm. La surface totale de la parcelle réunissant les deux expérimentations est de 1250 m². Le TIF a eu lieu le 1^{er} juin uniformément sur les deux essais fertilisation et irrigation.

Ces expérimentations sont 2 dispositifs en blocs avec répartition aléatoire des modalités au sein des blocs. Chaque essai compte 4 répétitions, l'essai "irrigation" comporte 2 modalités (irrigué, non irrigué) avec une fertilisation standard de 300 unités d'azote (U : kg/ha/an). L'essai "fertilisation" compte 3 modalités (0, 150 et 300 U). Les fertilisations ont été effectuées les mêmes jours suivant un calendrier de fertilisation (voir annexe I) sous forme d'urée (46% N) et de Solupotasse (50% K₂O) en pulvérisation foliaire.

Chaque modalité occupe 125m² sous billon.

Chaque parcelle élémentaire associée à une modalité est constituée de 2 portions de billons (1 billon pour les observations de croissance végétative et l'autre pour les observations d'émission foliaire), encadrées par deux billons de bordure ayant reçu le même traitement (voir fig. 5).

Les rejets ont été calibrés et triés par poids. Les plantations ont été effectuées avec des rejets de 3 calibres différents, les poids sont homogènes (+/- 25 g) au sein d'un bloc : 275g pour les billons du bloc 1, 225g pour les billons du bloc 2 et 175g pour les billons des blocs 3 et 4.

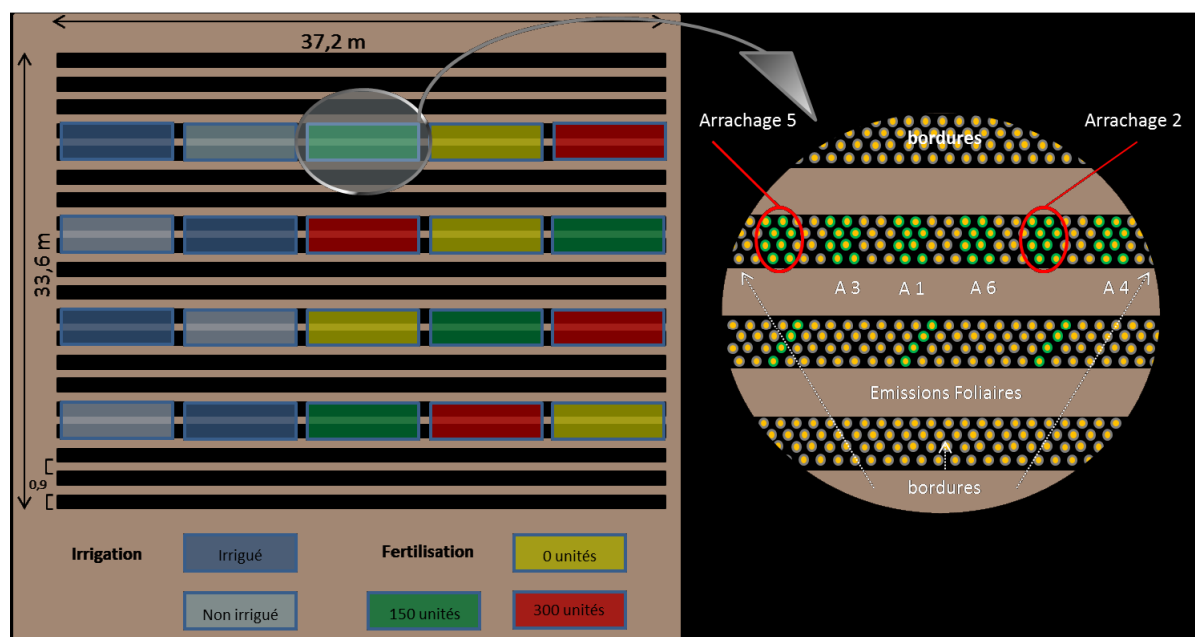


Figure 5 Schéma de la parcelle expérimentale. L'expérimentation sur l'irrigation a lieu à gauche de la parcelle (bleu foncé modalité irriguée, bleu ciel modalité non irriguée) et fertilisation à droite (Jaune : 0 U, vert : 150 U, rouge : 300 U). A droite, agrandissement d'un sous-bloc sur 4 billons, comprenant une modalité avec les plants qui seront prélevés aux différents arrachages (A) et ceux servant aux émissions foliaires (en vert) et les plants de bordures (marrons).

Six sessions d'arrachage (A1 à A6) ont été planifiées entre la plantation et le TIF (voir tableau 1), la position de chaque parcelle élémentaire ayant été déterminée de façon aléatoire. A chaque arrachage, les 8 plants d'une parcelle élémentaire, seront prélevés et analysés. Au total pour chaque modalité, 8 plants * 4 répétitions = 32 plants sont utilisés par arrachage. Soit un total final de 32 plants * 6 arrachages * 2 modalités = 384 plants pour l'expérimentation irrigation et 32 * 6 * 3 = 576 plants pour l'expérimentation fertilisation.

Tableau 1 Calendrier des 6 sessions d'arrachage exprimées en nombre de Jours Après Plantation (JAP). Les sessions d'arrachage durent de 7 à 10 jours pour couvrir les 5 modalités.

N° Arrachage	Jour Après Plantation (JAP)
1	98-105
2	136-146
3	164-173
4	193-203
5	217-227
6	248-257

L'irrigation a été pilotée dans un premier temps à dire d'expert puis par suivi des cannes tensiométriques Watermark (Irrometer Company, Riverside, CA) à partir du 21 novembre, date où elles ont pu être installées. L'irrigation a été déclenchée quand les cannes indiquaient une valeur moyenne de pression supérieure à 30 centibars (ou 300hPa), comme préconisé pour l'utilisation des sondes Watermark. La tension de succion du sol peut être exprimée en unités de pression ou en hauteur d'eau. Les pédologues emploient en routine une unité particulière, le pF, qui est le logarithme de la pression négative P exprimée en cm d'eau ($pF = \log_{10}(P)$). Une pression de 1 atmosphère (1013 hPa) correspond à un pF de 3. Le pF exprime la force avec laquelle le sol va retenir l'eau.

On considère ici que le potentiel hydrique à la capacité au champ est de 0.33 bar (pF 2,5) (Ladet, 2011), les cannes nous permettent donc de détecter le moment où l'on entame l'eau contenue dans la réserve utile du sol. Les dates et quantités d'irrigation ainsi que les autres données climatiques contenant les dates et quantités de précipitations, températures moyennes et ET_0 sont visibles en annexe (annexe II).

2. Mesures

L'étude de la croissance (biomasse végétative et croissance racinaire) et de la teneur en eau s'est faite de façon destructive par suivi à chaque arrachage du poids frais du plant entier et de ses différents organes (feuilles, tige, racines) puis de leurs poids sec après un passage de 48H à l'étuve à 85° des échantillons préalablement coupés. Nous pouvons ainsi calculer à chaque date d'arrachage, le poids moyen frais et sec et également la teneur en eau moyenne pour chaque modalité. La teneur en eau est calculée selon l'équation simple :

$$\text{Teneur en eau} = (\text{Poids Frais} - \text{Poids Sec}) / \text{Poids Frais}$$

Pour mesurer le rythme d'émission foliaire, la dernière feuille émise au cœur de la rosette du plant est marquée à la peinture chaque mois à partir du 2^{ème} mois. On compte ensuite chaque mois le nombre de feuillés émises entre deux marquages successifs. Ceci a été effectué sur 4 répétitions *12 plants, soit 48 plants par modalité.

3. Analyses statistiques

Le traitement des données a été effectué à l'aide du logiciel R. La normalité des données et l'homoscédasticité des variances ont été testées afin de choisir les tests statistiques (paramétriques ou non paramétriques) adaptés aux comparaisons des différents jeux de données.

Pour l'étude des poids, nous avons rapporté les poids au nombre de jours après plantation (données qui seront appelées PdsJAP) afin que les quelques jours séparant l'arrachage de deux traitements successifs n'influencent pas les résultats des comparaisons. Ces données pour les poids frais suivent bien une loi normale (Test de Kolmogorov Smirnov, voir en annexe VIII) mais elles présentent une hétéroscédasticité des variances (test de Bartlett). Nous avons donc décidé de comparer les différentes données avec une analyse de variance (anova) sur les données de poids préalablement transformées en logarithmes qui elles présentaient une homoscédasticité des variances. Un test HSD (Honestly Significant Difference) (Tukey) sera effectué en post-hoc pour comparer les moyennes deux à deux.

Les analyses portant sur les poids secs et les teneurs en eau des plants ont été réalisées à l'aide du test non paramétrique Kruskal, les données étant moins nombreuses que pour les poids de plants, elles ne présentent pas d'homoscédasticité des variances même sur les données normalisées.

Les rythmes d'émission foliaire ont été comparés par anova, ces données étant normales et de variances non différentes. Un test HSD (Tukey) sera effectué en post-hoc.

III. Résultats

1. Croissance

a) Biomasse végétative

Pour l'essai fertilisation dans un premier temps, en observant les courbes de croissance des 3 modalités de la plantation au TIF, on constate que les traitements 300 U et 0 U suivent la même dynamique de croissance avec un palier autour des jours 200 à 220 après plantation où il n'y a pas d'augmentation de poids (fig.6). Les plants ayant reçu 150U d'azote présentent un palier plus précoce mais rattrapent cependant leur retard sur la fin du cycle végétatif. Les modalités 300 U et 150U suivent des courbes de croissance relativement proches malgré la différence de dynamique observée vers le jour 200 après plantation. Le poids final au TIF sera plus faible pour la modalité 0 U, le retard de croissance des plants de cette modalité semble être dû à un démarrage de la phase exponentielle de croissance plus tardif entre les jours 150 et 200.

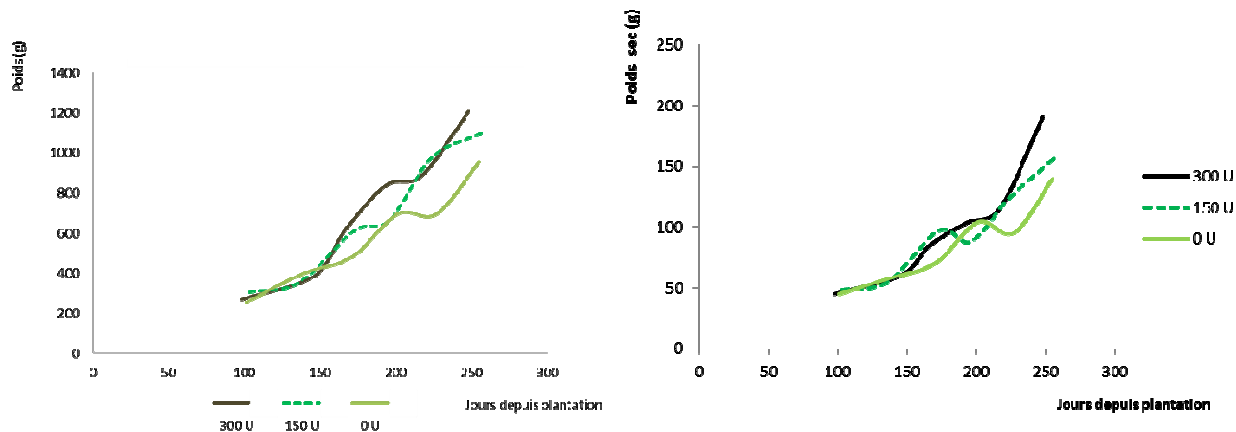


Figure 6 Courbes de croissance moyennes des plants (g) au cours du cycle végétatif en fonction de la fertilisation (Vert clair : 0 U, foncé : 150 U et noir : 300 U) en poids frais (à gauche) et poids sec (à droite).

L'analyse de variance sur ces données (cf partie II. 3) indique qu'il y a bien un effet significatif du traitement sur les courbes de croissance de poids frais (anova, $p < 0.015$) et secs (Kruskal, ddl=2, $\text{Chi}^2 = 0.0166$). La comparaison des poids moyens frais de la plantation au TIF a révélé deux classes, les poids moyens des plants de la modalité 300 U sont significativement plus élevés que celle de la modalité 0 U (poids frais : HSD ; $p < 0.006$; Kruskal, ddl=2, $\text{Chi}^2 = 0.0166$). Les poids moyens de plant de la modalité 150 U sont intermédiaires, ils ne diffèrent significativement ni de la modalité 300 U ni de la modalité 0 U.

Nous avons décidé de comparer les poids/nombre de jours depuis plantation des 3 traitements à chaque série d'arrachage (fig. 7, cf partie II. 3). Il n'y a pas de différence significative entre les différentes modalités en début de cycle végétatif. La modalité 300 U présente un poids significativement plus important que les autres traitements à partir de l'arrachage 3 par rapport aux deux autres modalités. La modalité à 150 U se démarque de celle à 0U uniquement lors de l'arrachage 5. L'arrachage effectué au moment du TIF révèle une différence significative de poids entre les traitements 300 U et 0 U seulement (poids frais : anova, $p < 0.04179$; différence 300 U – 0 U HSD, $p < 0.013$, poids sec : Kruskal, ddl=2, $\text{Chi}^2 = 0.1$), avec des poids moyens respectifs de 1206g, 1100g et 955g pour les modalités 300 U, 150 U et 0 U (soit 4.86g/j ; 4.28g/j et 3.75g/j).

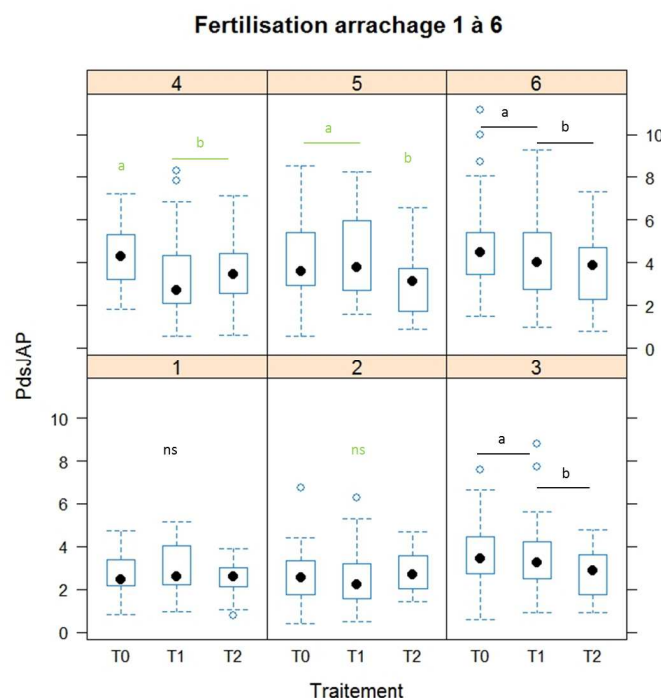


Figure 7 Comparaisons des poids moyens frais des plants/nombre de jour depuis plantation (PdsJAP) aux différents temps correspondant aux arrachages 1 à 6 pour les modalités 300 U (T0), 150 U (T1) et 0 U (T2). La couleur des astérisques correspondent aux tests utilisés paramétriques (en noir) ou non paramétriques (en vert).

Pour l'essai irrigation, les deux modalités présentent une croissance d'allure sigmoïde type de croissance végétale en trois phases. Une phase initiale plus lente, suivie d'une phase de croissance exponentielle puis un plateau de croissance au-delà du jour 200 où la croissance est à nouveau ralentie (fig.8). Il est important de noter que pour la modalité non irriguée (courbe verte) la phase initiale est beaucoup plus longue que pour la modalité irriguée (courbe noire). La ligne en pointillée représente le poids moyen du rejet à la plantation, l'endroit où les courbes de croissances moyennes coupent cette ligne représente ce que nous appellerons la « reprise de croissance » des plants. Ces temps (autour de 75 jours après plantations pour les plants irrigués et 140 jours pour les non irrigués) indiquent les moments où les plants commencent à gagner du poids par rapport à leurs poids initiaux, nous nous servons de ces valeurs lors du paramétrage modèle.

L'analyse de variance révèle un effet significatif du traitement et du temps sans interaction, indiquant que les deux courbes de croissance moyenne suivent la même dynamique. Les croissances moyennes sont significativement différentes (poids frais : anova, $p < 2.2e-16$ et poids sec : Kruskal, $ddl=2$, $Chi^2=0$) avec une croissance supérieure pour la modalité irriguée et des poids moyens frais de plants, 8 mois après plantation, de 888g (3.52g/j) pour les plants irrigués et de 592g (2.35g/j) pour les plants non irrigués (fig. 8) (Anova, poids frais : $p < 0.0009$; poids sec : $p < 0.0138$).

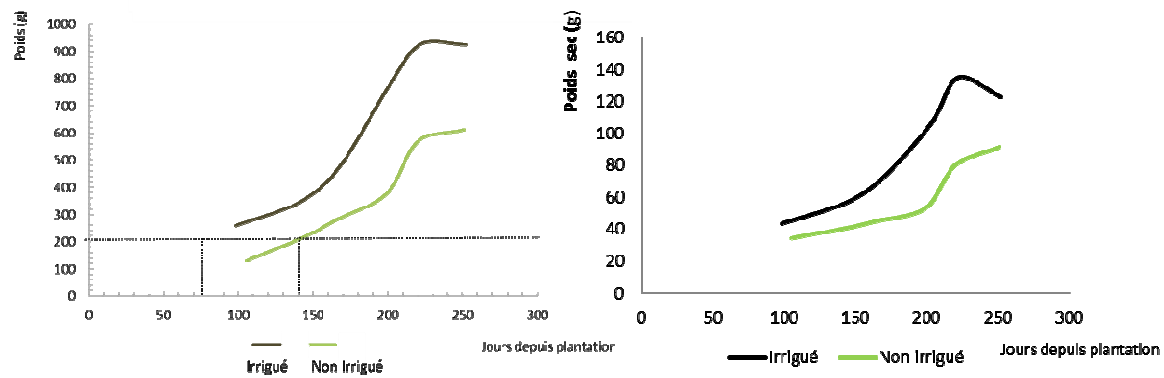


Figure 8 Courbes de croissance moyenne au cours du temps de la modalité irriguée (noir) et non irriguée (vert) en poids frais (à gauche) et poids sec (à droite). En pointillé, représentation du poids moyen des rejets à la plantation et temps auxquels le poids moyens des plants deviennent supérieurs (environ 75 et 140j après plantation pour les irrigués et non irrigués respectivement).

En observant l'évolution du poids moyen des plants rapportés au JAP à chaque session d'arrachage, nous constatons que les courbes de croissance moyenne des plants issus des modalités irriguée et non irriguée se distinguent dès le premier arrachage (fig.9) de façon significative avec un poids de plants plus important avec irrigation. La différence de croissance entre ces deux modalités est significative tout au long du cycle de développement végétatif (poids frais : Anova, A1 $p < 2.2 \cdot 10^{-16}$; A2 $p < 1.4 \cdot 10^{-3}$; A4 $p < 3.1 \cdot 10^{-9}$; A5 $p < 0.00012 \cdot 10^{-4}$; A6 $p < 0.0009$; A3 Kruskal $p < 4.6 \cdot 10^{-5}$).

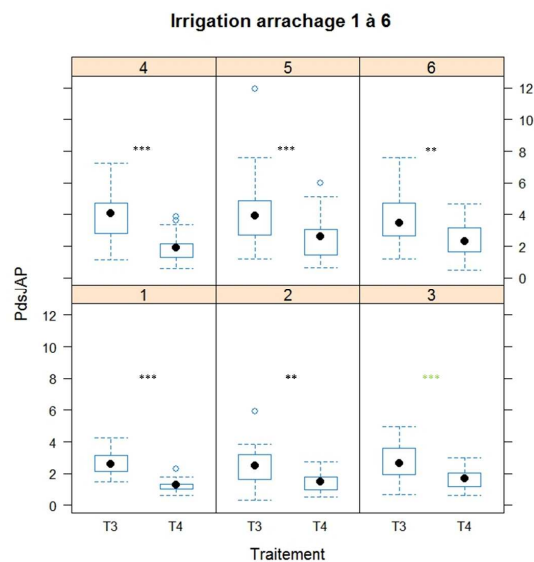


Figure 9 Comparaison des PdsJAP de la modalité irriguée (T3) et non irriguée (T4) aux temps correspondant aux arrachages de 1 à 6. La couleur des astérisques correspondent aux tests utilisés paramétriques (en noir) ou non paramétriques (en vert).

b) Croissance racinaire

Pour l'essai fertilisation, les modalités 300 U et 150 U présentent des croissances racinaires semblables et significativement plus élevées que celle de la modalité 0 U (fig.10, pairwise.t.test ; ddl=2 ; 300U-0 U : p 1.2e-05 ; 150 U – 0 U : p 3.5e-05).

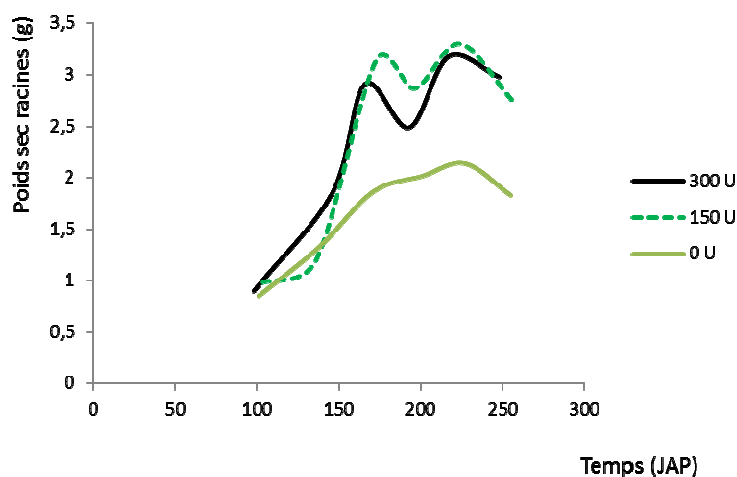


Figure 10 Courbes de croissance racinaire en poids sec (g) en fonction de la fertilisation

Pour l'essai irrigation, la croissance racinaire est significativement plus élevée pour la modalité irriguée que pour la modalité non irriguée (fig. 11, Kruskal ; ddl=1 ; χ^2 : 4.5e-13).

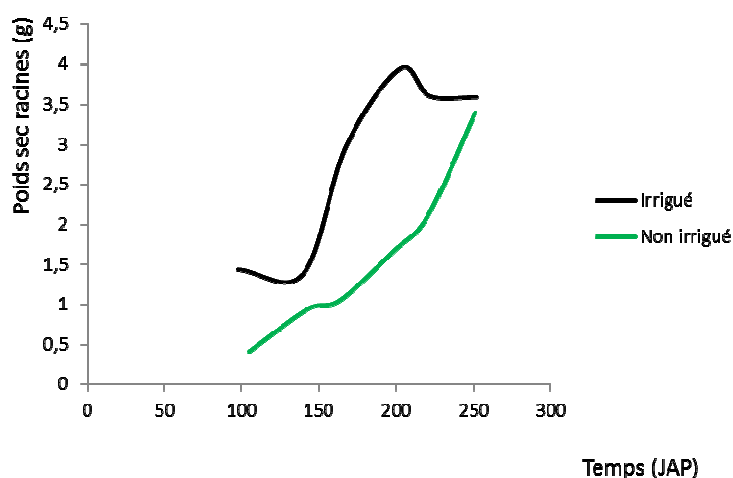


Figure 11 Courbes de croissance racinaire en poids sec (g) en fonction de l'irrigation

2. Teneur en eau

Les résultats de l'essai fertilisation montrent que les teneurs en eau varient légèrement au cours du cycle végétatif (tableau 2). Elles sont en moyenne de 84% (85,1% pour 300 U ; 84,6% pour 150 et 84,5% pour 0 U).

Tableau 2 Teneur en eau des plants (en % de poids frais) pour les 3 modalités fertilisation aux 6 temps d'arrachage et écart-types associés.

N° arrachage	300 U	écart-type	150 U	écart-type	0 U	écart-type
moyenne	85,1	3,2	84,6	3,8	84,5	3,1
1	82,0	5,1	82,7	4,8	81,2	4,1
2	84,0	2,2	82,5	6,0	85,1	2,5
3	85,7	1,3	83,9	2,2	84,9	1,6
4	87,3	0,9	86,1	1,3	84,3	3,4
5	86,8	1,2	87,0	0,9	85,9	1,2
6	84,7	3,3	85,5	1,9	85,5	2,0

Nous avons comparé les données des différents traitements sur le cycle végétatif complet à l'aide d'un test de Kruskal (cf. partie II. 3). La teneur en eau est globalement significativement plus élevée pour la modalité 300 U en comparaison à la modalité 0 U (Kruskal, ddl=2, $\chi^2=0.003$). Le traitement 150 U reste une fois encore intermédiaire et ne diffère significativement ni du traitement 300 U ni du traitement 0 U. La teneur en eau est supposée sensible à la condition hydrique des plants ainsi qu'au stade de développement, nous avons donc comparé ces valeurs entre traitements aux différents arrachages (fig. 12). Il n'y a pas de différence significative de teneur en eau entre les différentes modalités à la fin du cycle végétatif. Pour les arrachages 1, 3, 4, 5, cependant, on constate une teneur en eau plus élevée pour le traitement 300U par rapport au traitement 0U (Kruskal, ddl=2, A1 $\chi^2=0.08$; A3 $\chi^2= 3e-4$; A4 $\chi^2= 7e-6$; A5 $\chi^2=1e-3$).

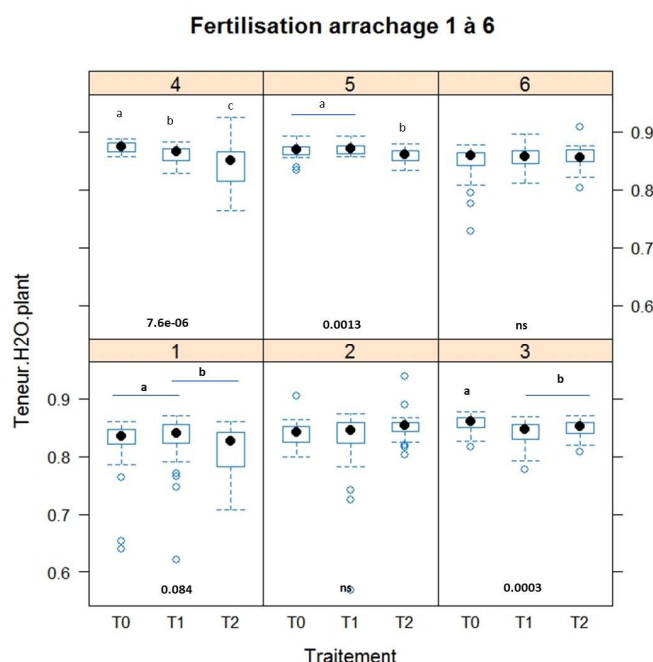


Figure 12 Comparaison de la teneur en eau des plants pour les différentes modalités de fertilisation en fonction du temps.

Comme pour les poids de plants, nous avons constaté qu'il y a tout au long du cycle végétatif une différence de teneur en eau entre les plants irrigués et non irrigués (tableau 3 et fig. 13) et que cette différence est particulièrement marquée au premier arrachage qui suit une longue période de sécheresse (Kruskal, ddl=1, A1 : $\text{Chi}^2= 1.7\text{e-}7$; A2 : $\text{Chi}^2= 2\text{e-}3$; A3 : $\text{Chi}^2=0.01$; A4 : $\text{Chi}^2=0.002$; A5 : ns $\text{Chi}^2=0.8$; A6 : $\text{Chi}^2=0.001$). Globalement la teneur en eau des plants de la modalité irriguée est plus élevée que celle de la modalité non irriguée (Kruskal ; ddl=1 ; $\text{Chi}^2=7.3\text{e-}08$).

Tableau 3 Teneur en eau moyenne des plants (en % de poids frais) pour la modalité irriguée et non irriguée pour les 6 arrachages.

N° arrachage	Irrigué	écart-type	Non Irrigué	écart-type
moyenne	84,6	4,1	82,0	5,7
1	81,7	4,0	72,7	5,3
2	82,3	7,7	81,6	3,5
3	84,5	2,1	83,2	2,5
4	86,4	1,5	85,3	1,9
5	85,1	2,8	84,9	4,6
6	86,7	1,1	85,2	2,4

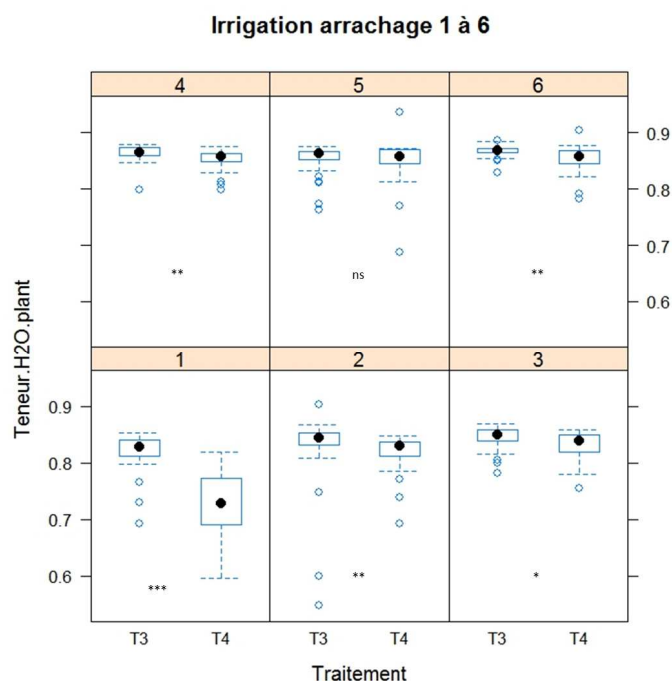


Figure 13 Comparaison de la teneur en eau de la modalité irriguée et non irriguée à différents temps correspondant aux arrachages de 1 à 6

3. Développement

Les résultats du suivi mensuel du nombre de feuilles émises montrent que le taux de fertilisation a une influence sur le taux d'émission foliaire. On peut observer une baisse du nombre de feuilles émises au cours du cycle végétatif avec la quantité de fertilisation reçue par les plants d'ananas (fig. 14, en haut). Les différences ne sont pas significatives lors du premier arrachage, elles le sont à partir du second et jusqu'à la fin du cycle végétatif.

Les plants non irrigués ont émis significativement moins de feuilles que les plants irrigués (fig.14, en bas) comme observé par Py en 1960 (Py, 1960). En regardant plus en détail, arrachage par arrachage, on constate que la différence finale observée dans le nombre de feuilles émises n'est due qu'à la différence d'émission foliaire ayant eu lieu avant le premier arrachage.

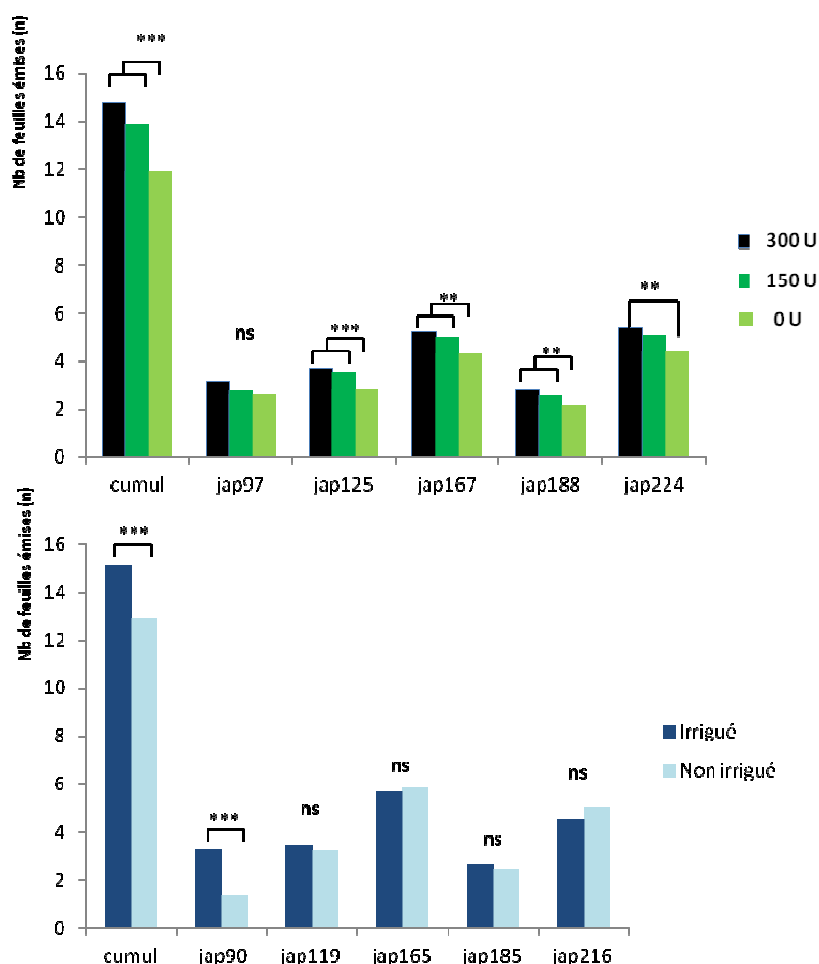


Figure 14 Rythmes d'émission foliaire (en nombre de feuilles émises depuis le dernier marquage) à différents JAP en fonction de la fertilisation (en haut) et de l'irrigation (en bas).

4. Suivi du potentiel de pression du sol

On peut voir sur la figure 15 une représentation du potentiel hydrique moyen mesuré pour les cannes tensionométriques de la modalité irriguée (en bleu foncé) et non irriguée (en bleu ciel). La différence majeure de potentiel de sol entre les deux modalités se situe cependant en début de cycle, jusque fin novembre (pluie) puis en décembre et à partir de fin juin. La modalité irriguée a reçue 4 apports d'eau courant octobre avant la plantation des cannes tensionométriques donc non visibles sur ce graphique.

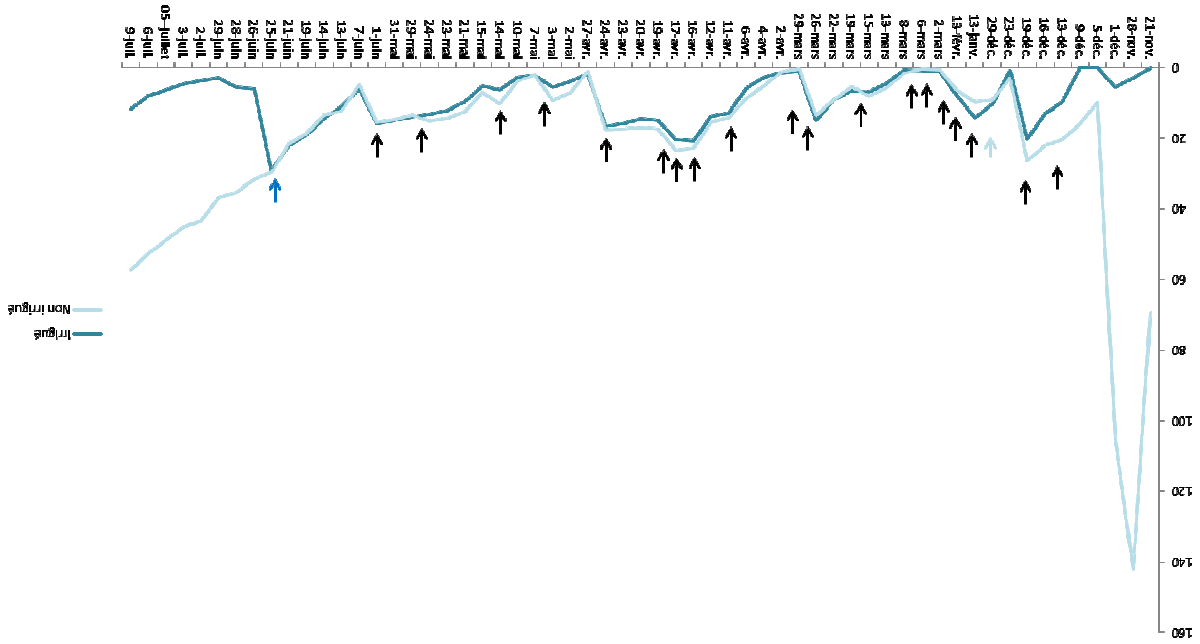


Figure 15 Représentation du potentiel hydrique du sol à 30cm (kPa) dans le billon pour la modalité irriguée (bleu foncé) et non irriguée (bleu ciel). Les flèches indiquent les précipitations (noir) ou les irrigations spécifiques (couleur de la modalité concernée).

IV. Modélisation du bilan hydrique et paramètres associés

1. Détermination du besoin en eau de la culture et dynamique des flux

La détermination des besoins en eau de la culture d'ananas est essentielle puisque la plante est particulièrement sensible au régime hydrique pendant les 4 mois suivant la plantation (Malézieux et al., 2003) et qu'elle est cultivée dans les différentes zones de l'île soumises à des régimes pluviométriques différents. Dans cette partie nous expliquerons plus précisément les étapes d'élaboration du bilan hydrique représentant un calcul entre les entrées et les sorties en eau du réservoir dynamique associé à la culture. Les entrées d'eau sont constituées des précipitations et de l'irrigation le cas échéant avec soustraction du drainage et ruissellement éventuels. La réserve en eau utile de la plante est limitée, comme nous le verrons plus loin, par les capacités de rétention en eau des sols et par la croissance de la zone d'exploration racinaire. Les sorties sont sous forme de transpiration de la culture et d'évaporation du sol regroupés sous le terme d'évapotranspiration.

Afin de déterminer le besoin en eau d'une culture, quatre aspects doivent être considérés de façon fondamentale : le climat, le sol, la plante et les itinéraires techniques associés à la culture étudiée. Le bilan hydrique se fera par différence des entrées et des sorties d'eau sur une profondeur croissant avec les racines jusqu'à la zone maximum d'exploration racinaire. On peut résumer ce bilan simplement (fig. 16) de la façon suivante :

Bilan hydrique = contenu en eau du réservoir en eau utile du sol + (précipitations + irrigation - drainage) - (évapotranspiration)

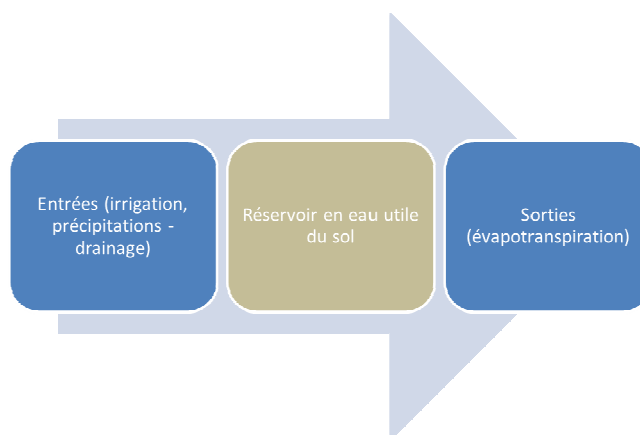
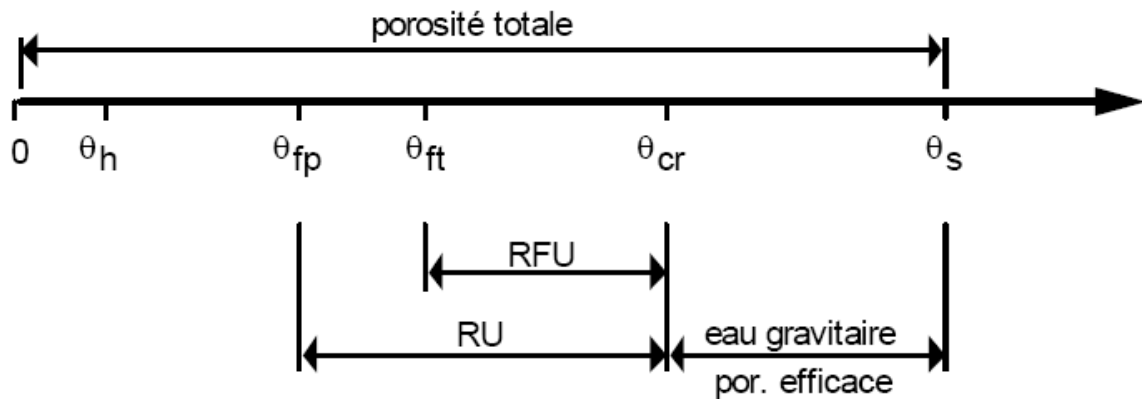


Figure 16 schéma de fonctionnement du bilan hydrique mimant la dynamique de remplissage d'un réservoir par les entrées et sorties d'eau

Différents taux remarquables d'humidité dans le sol sont importants pour le bilan hydrique (fig.17) :



Taux remarquables d'humidité

Figure 17 Taux d'humidité remarquables : Teneur en eau à saturation θ_s ; Teneur en eau à la capacité de rétention $\theta_{cr} = H_{cc}$; Point de flétrissement permanent : θ_{fp} ; Point de flétrissement temporaire : θ_{ft} ; $RU = (\theta_{cr} - \theta_{fp}) \cdot Z_r$; $RFU = (\theta_{cr} - \theta_{ft}) \cdot Z_r$

L'eau totale disponible pour la plante (Réserve Utile : RU) se situe entre l'humidité à la capacité au champ (également appelé capacité de rétention, θ_{cr}) et l'humidité au point de flétrissement permanent (θ_{fp}) et est fonction de l'importance de la zone d'exploration racinaire (Z_r) et de la texture du sol (Allen et al., 2000 ; Ladet, 2011):

$$RU = (\theta_{cr} - \theta_{fp}) * Z_r \text{ (mm)}$$

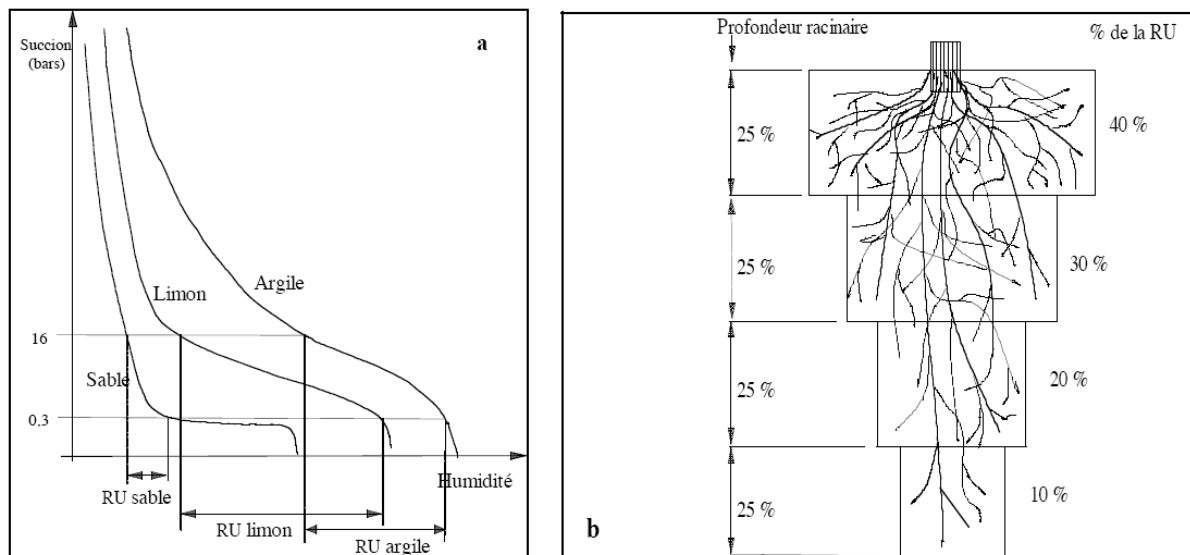


Figure 18 a) évolution des valeurs caractéristiques d'humidité (capacité au champ et point de flétrissement permanent) en fonction du type de sol. **b)** discrétisation de la Réserve Utile en fonction de la profondeur en tenant compte de la décroissance de la densité racinaire avec la profondeur (Ladet 2011).

La réserve en eau facilement utilisable (RFU) est une sous partie de la RU définissant l'eau disponible pour la plante avec un prélèvement racinaire optimum, c'est à dire non limité par un potentiel de pression du sol trop fort. Un coefficient de stress hydrique peut être appliqué avant d'atteindre le point de flétrissement permanent. En effet, lorsque le contenu en eau du sol est inférieur à la RFU, l'eau devient de plus en plus difficile à extraire (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2000), elle devient un facteur limitant et engendre un stress pour la plante. Ce coefficient de stress hydrique va varier entre 1 et 0 à partir du Θ_{ft} (humidité au point de flétrissement temporaire) qui marque la limite de la RFU (Réserve Facilement Utilisable) jusqu'à Θ_{fp} qui marque la fin de la RU (Réserve Utile). Il sera égal à :

$$K_s = \text{eau contenue dans la RU/RFU}$$

Des tests ont été effectués pour voir s'il fallait considérer ou non les transferts d'eau latéraux entre les passe-pieds (sol nu) et le billon (avec paillage polyéthylène) (fig.19). Nous avons placé 4 cannes tensiométriques dans le billon à 4 profondeurs différentes (15, 20, 30 et 35cm), face à 2 cannes tensiométriques placées dans le passe-pied à 10 et 15 cm de profondeur. Ces cannes nous permettront également de voir l'évolution du potentiel hydrique du sol avec la profondeur. Nous aborderons les résultats dans la partie « modèle et calibration ».

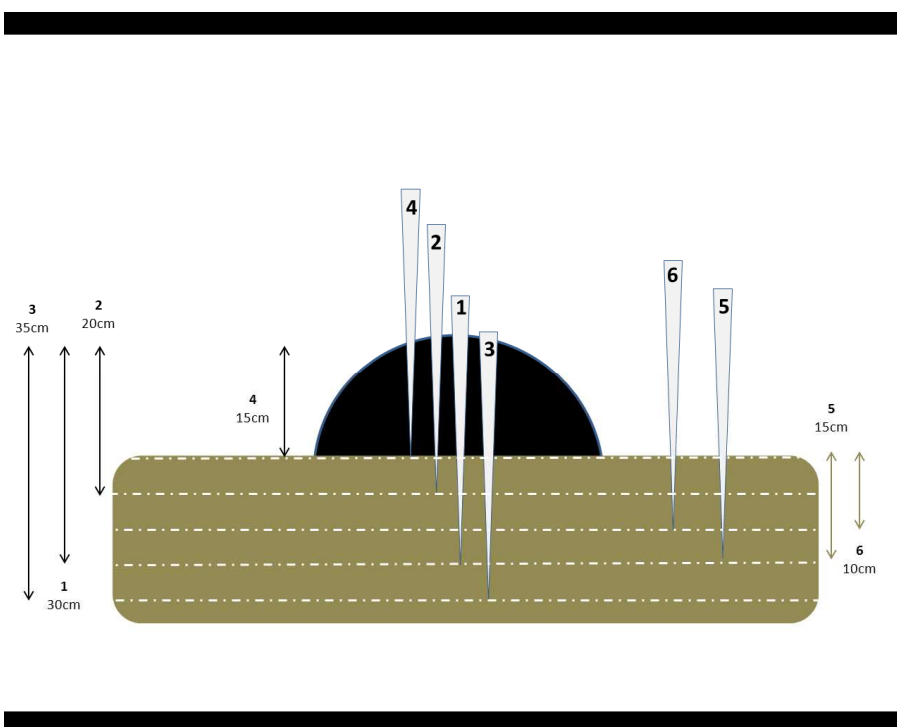


Figure 19 Schéma du test où 4 cannes tensiométriques (1 à 4) ont été placées dans le billon à 4 profondeurs différentes (15, 20, 30 et 35cm), face à 2 cannes tensiométriques (5 et 6) placées dans le passe-pied à 10 et 15 cm de profondeur

Dans un deuxième temps, le besoin en eau de la culture va être dépendant de la demande évaporative liée au climat (énergie solaire, température, humidité relative de l'air et vitesse du vent) et des caractéristiques de la plante (stockage d'eau dans les tissus, mécanismes de régulation stomatique, résistance à l'air).

Globalement, on peut avoir un premier aperçu du besoin en eau par région en regardant une cartographie des déficits climatiques qui représentent la somme des différences positives entre l'ETP-PENMAN (ou ET_0) et la pluviométrie mensuelle (en mm, fig. 20) (Raunet, 1991). La demande évaporative représentée par ET_0 est l'évapotranspiration de référence. C'est une donnée dynamique qui représente l'évapotranspiration d'un gazon homogène de 12cm en phase active de croissance, recouvrant totalement le sol et non limité en eau pour un lieu géographique donné sous les conditions climatiques de l'instant considéré.

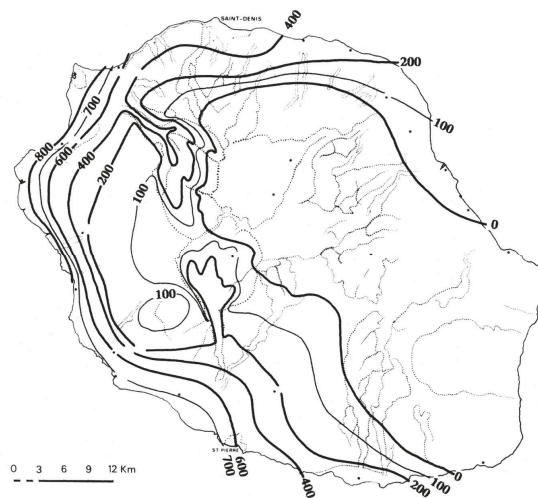


Figure 20 Carte des déficits climatiques de l'île de La Réunion (Raunet, 1991)

Si l'on observe cette cartographie, on constate que toutes les zones Nord, Ouest et Sud-Sud-Ouest présentent des déficits climatiques annuels positifs signifiant un besoin d'irrigation pour permettre une exploitation agricole des sols. Cependant, ces données ne peuvent pas être utilisées telles quelles pour le pilotage de l'irrigation. Il faut tenir compte de la nature des sols, des paramètres associés aux cultures en place (coefficients culturaux, interception du rayonnement), des brise-vent, de la couverture éventuelle des cultures et du travail du sol.

L' ET_0 , est une valeur de référence considérée comme un paramètre climatique commun et corrigé par le K_c , le coefficient cultural spécifique. Il pondère ET_0 pour donner l'évapotranspiration maximale d'une culture donnée : ETM lorsque celle-ci se trouve en condition optimale de croissance.

$$ETM = ET_0 \cdot K_c$$

Le K_c est la somme de K_{cb} (coefficient cultural biologique propre à la culture) et K_e qui est l'évaporation du sol (Allen, 2000). K_c varie en fonction des pratiques culturales, notamment

via le K_e qui peut être modifié par la présence d'un couvert végétal, mort ou vivant ou d'une couverture du sol par du polyéthylène.

Le K_{cb} varie généralement au cours du cycle cultural et peut prendre 3 valeurs au cours du cycle. Une valeur initiale, intermédiaire et finale marquant un maximum au milieu du cycle. Pour l'ananas cependant, nous verrons que ce schéma n'est pas respecté et que cette valeur varie très peu au cours du cycle.

Les conditions pédoclimatiques dans lesquelles évolue la culture peut l'amener à subir des périodes de stress hydrique pendant lesquelles l'eau est un facteur limitant, plus difficile à extraire voire inutilisable. Ces phénomènes peuvent réduire l'ETM. Pour ces raisons, des calculs sont utilisés pour obtenir l'évapotranspiration réelle d'une culture (ETR) correspondant à l'ETM pondérée par le facteur de stress K_s (égal à 1 en l'absence de stress).

$$ETR = ETM \cdot K_s$$

Dans la forme du coefficient double (Allen R. , 2000), le coefficient cultural de base est considéré comme étant le rapport entre ETR/ET_0 quand la surface du sol est sèche mais l'eau contenue dans la zone racinaire est optimale pour la transpiration de la plante. Le K_c est défini comme étant $K_s \cdot K_{cb} + K_e$

$$ETR_c = (K_s \cdot K_{cb} + K_e) \cdot ET_0$$

La dynamique d'apparition d'un stress hydrique est fortement dépendante de l'importance du réservoir d'eau associé à la plante. La quantité d'eau qu'il peut contenir est étroitement liée à la profondeur de sol exploré par les racines ainsi qu'aux propriétés du sol définissant sa capacité à contenir et retenir l'eau. Les capacités de succion (qui détermineront la réserve en eau facilement utilisable comme nous l'aborderons plus loin) et les éventuelles résistances au stress hydrique de la plante seront pris en compte pour moduler les sorties d'eau par rapport à celui de la culture de référence. Enfin, les paramètres liés à la culture et aux pratiques culturales, regroupés en K_c , influencent également la dynamique de pertes en eau du sol et par là même celle de l'apparition du stress.

2. Modèle

Le modèle a été réalisé avec le logiciel Stella (ISEE systems). Je décrirai son élaboration en reprenant les trois étapes précitées (fig. 16). Premièrement, je délimiterai la réserve utile en eau du sol limitée à la zone d'exploration racinaire, ensuite je définirai les entrées d'eau dans ce réservoir (précipitations et irrigation) et enfin, je décrirai les sorties (évapotranspiration). Les termes en gras font directement référence aux termes utilisés dans le modèle (fig 21 et annexe III).

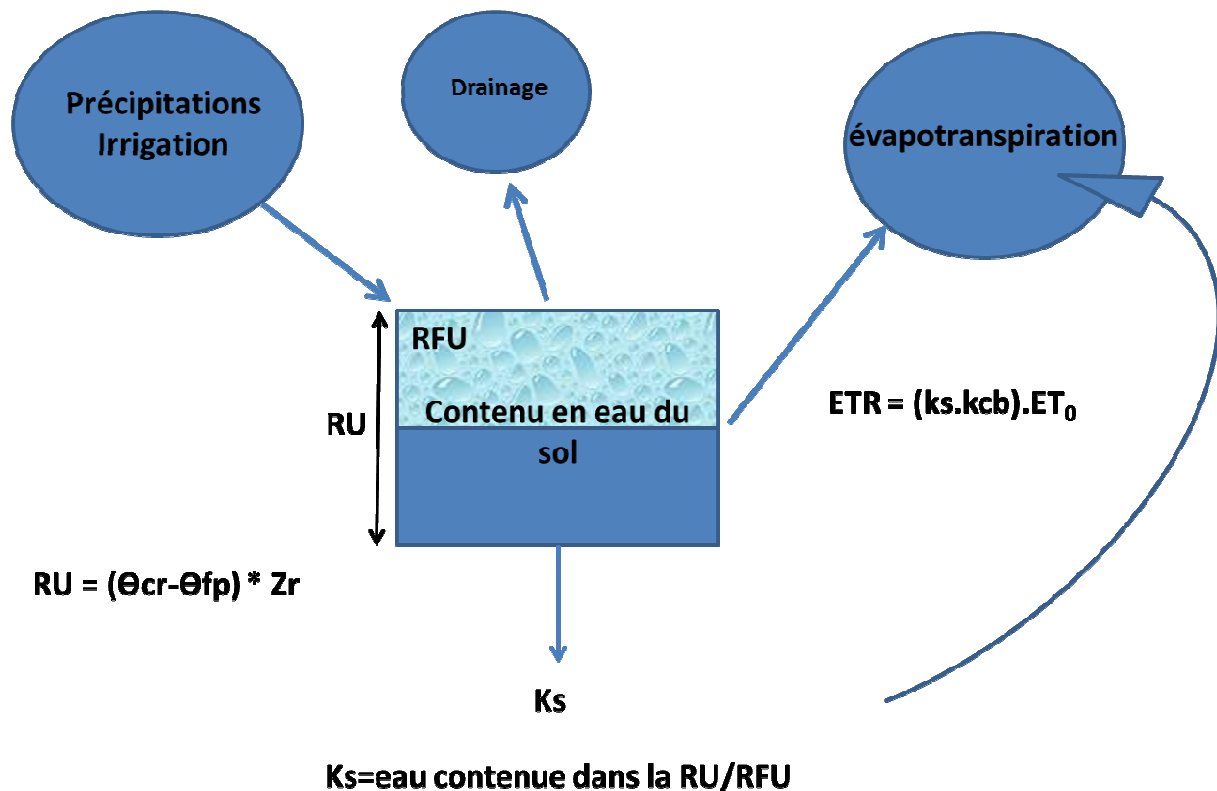


Figure 21 schéma de fonctionnement du module de bilan hydrique. RU : Réserve Utile ; RFU : Réserve Facilement Utilisable ; Zr : zone d'exploration racinaire ; Θ_{cr} : humidité à la capacité de rétention du sol ; Θ_{fp} : humidité au point de flétrissement permanent ; Ks : coefficient de stress hydrique. Kcb : coefficient cultural biologique ; ET_0 : évapotranspiration de référence ; ETR : évapotranspiration réelle.

a) Paramètre de RU et RFU (réservoir)

La première étape de l'élaboration du bilan hydrique est de définir le réservoir d'eau utilisable par la plante. Comme nous l'avons vu plus haut, l'eau disponible est fonction des capacités de rétention d'eau du sol et de la zone d'exploration racinaire :

$$\text{Eau totale disponible (mm)} = (\Theta_{cr} - \Theta_{fp}) \cdot Z_r \text{ (mm)}$$

Une étude du sol a été effectuée en détail sur la station de Bassin-Plat en 1980. Les caractéristiques physiques de notre parcelle rapportent une granulométrie avec une teneur en argile de 66% pour l'horizon 0-25cm, une teneur en limons de 26% et une fraction sableuse de moins de 8%. C'est un sol d'argile lourde à texture très fine. Ces sols font preuve d'une grande capacité de rétention en eau (39.6%) mais avec une humidité au point de flétrissement permanent élevée de 28% dû à la force de rétention de l'eau par l'argile.

Pour notre parcelle expérimentale, l'eau totale disponible pour la plante croît avec les racines avec une profondeur d'exploration racinaire (**Zr**) comprise entre 5 et 20 cm. **Θ_{cr}** (teneur en eau à la capacité de rétention) étant égale à 39,6% et **Θ_{fp}** (teneur en eau au point de

flétrissement permanent) à 28%, nous obtenons une réserve utile évoluant entre $(0.396-0.28)*50\text{ mm}= 5.8\text{mm}$ et $(0.396-0.28)*200\text{ mm}= 23.2\text{mm}$.

Afin de simuler l'impact de la croissance racinaire sur la RU, nous avons appliqué un coefficient de **pente de croissance racinaire** égale à 0.3. **Zr** a été considérée comme étant le produit de ce coefficient et du poids du plant. La valeur de **Zr** a été contrainte à un minimum de 5 cm et un maximum de 20 cm pour notre parcelle après observation des rejets et du sol sous billons. En effet, même si les racines peuvent atteindre 40cm, leur zone d'exploration est limitée à la zone où le sol est suffisamment travaillé pour qu'elles puissent s'y insérer, soit un peu plus que la hauteur du billon.

La **RFU** est, elle, liée à la plante et au sol et est considérée pour la culture d'ananas comme représentant environ 50% de la RU, soit 11.6mm maximum pour des plants non stressés en fin de cycle végétatif (Allen et al., 2000). Certains auteurs décrivent la RFU comme représentant 75% de la RU ou dépendante de la texture du sol (Ladet, 2011).

b) Paramètre des précipitations et de l'irrigation (entrées)

Le calcul du bilan hydrique va différer en fonction du mode d'irrigation utilisé. Si l'irrigation est faite par aspersion, elle peut être considérée comme de la pluie (en mm) uniformément distribuée sur l'ensemble de la parcelle. Des travaux ont montré que 40% de la pluie et de l'irrigation par aspersion pénètre sous le polyéthylène à la plantation, 50%, après un mois et 75 à 80 % à partir du deuxième mois et pour le reste du cycle (Combres, 1983). Par contre, si l'irrigation est effectuée au goutte à goutte sous polyéthylène, le besoin en eau se limite à la zone de sol sous le billon sur une profondeur équivalente à la zone racinaire mais est utilisée à 100%.

La parcelle expérimentale est irriguée au goutte-à-goutte sous billon, l'eau distribuée est donc mesurée en m^3 . Puisque les différents paramètres en lien avec le bilan hydrique (dont les **précipitations**) nous avons choisi pour simplifier les calculs de convertir les m^3 en mm. La surface totale est de 1250 m^2 dont la moitié constitue les billons : 625m^2 . Sur la totalité des billons seuls 500m^2 sont irrigués ($4\text{ modalités} * 125\text{m}^2$). Cette surface est entrée sous le paramètre **surface** du modèle et peut donc être modifiée facilement. Les 125m^2 restant portent la modalité non irriguée de l'expérimentation irrigation. Pour convertir l'eau distribuée des m^3 en mm, on multiplie par 1000 puis on divise par la surface, ainsi **Irrigation** = volume d'eau en $\text{m}^3 * 1000/\text{surface en m}^2$. Par exemple 8 m^3 vont être équivalents à 16mm :

$$8\text{m}^3*1000/500\text{m}^2=16\text{mm}$$

Pour les **précipitations** et l'irrigation en pulvérisation (**irrig pulve**), un coefficient de 0.4 de la plantation au 1^{er} mois, de 0.5 jusqu'au 2^{ème} mois puis de 0.8 est appliqué, correspondant à la part d'eau passant sous le billon (Combres, 1983) pour que les **précipitations** et l'**irrig pulve** soient considérées comme efficaces. Les tests que nous avons effectué en plantant des cannes dans le passe-pied et le billon (partie II) montrent que le sol présente un retour à la

sécheresse beaucoup plus rapide au niveau des passes-pieds après une pluie que pour le billon sous poly (fig. 22). Ces résultats indiquent que les transferts d'eau latéraux potentiels sont négligeables, c'est pourquoi nous ne prendrons pas en compte d'éventuels échanges entre passe-pied et billon.

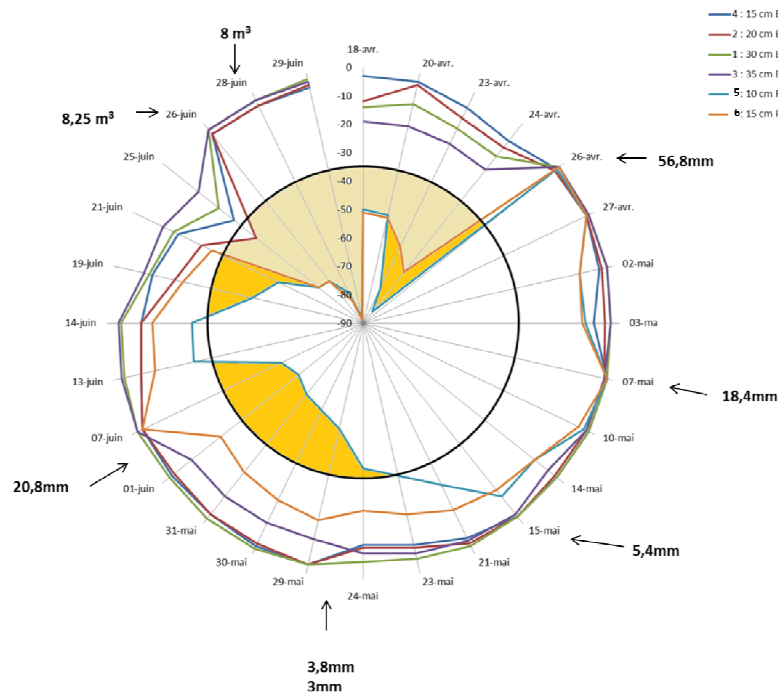


Figure 22 Représentation des données des potentiels hydriques du sol aux différentes profondeurs au cours du temps par rapport à potentiel de 35kPa (cercle noir). Les données exprimées en mm représentent des précipitations, celles en m³ des irrigations sous polyéthylène. B : Billon et PP : Passe-pieds.

L'eau sol a une valeur de départ à laquelle s'ajoutent les **Entrées (apports H2O - Drainage)** et se soustraient les **Sorties**.

L'**apport H2O** correspond à la somme des entrées (**irrigation, irrigation pulve efficaces et précipitations efficaces**). Si les apports + l'eau sol dépassent la **RU**, cette eau sera éliminée sous forme de **Drainage** au niveau du calcul des **Entrées**.

c) Evapotranspiration (sorties)

Les sorties sont constituées de l'**ETR** qui correspond comme nous l'avons décrit plus haut à :

$$ETR = (K_s K_{cb} + K_e) \cdot ET_o$$

Le **K_{cb}** varie généralement au cours du cycle cultural. Pour l'ananas cependant, il varie très faiblement suivant trois étapes en fonction du stade de la plante et de l'indice de surface

foliaire (**LAI**). La FAO fournit les coefficients culturaux de nombreuses cultures en renseignant le **Kcb** initial, intermédiaire et final. Pour l'Ananas, ils sont de 0.4, 0.2 et 0.2 sous polyéthylène. Cette variation est faible comparée à la majorité des plantes, par exemple, la canne à sucre beaucoup cultivée à la Réunion va voir, au cours de son cycle, son Kcb prendre les valeurs de 0.15 – 1.20- 0.70 (Allen et al., 2000). Nous déciderons donc de négliger cette variation en la conservant fixe de 0.3 dans le modèle. De plus, les études réalisées sur l'ananas jusqu'à ce jour ne parviennent pas à statuer sur une valeur de Kc (Carr, 2012).

Dans notre cas avec une culture sous polyéthylène, le coefficient **Ke** représentatif de l'évaporation du sol, est considéré comme nul.

d) Coefficient de stress hydrique : Ks

Le **Ks** est un coefficient de stress hydrique qui va agir sur plusieurs variables du modèle. Il varie entre 0 et 1 selon l'équation :

$$\mathbf{Ks = \text{eau contenue dans la RU/RFU}}$$

Tout d'abord, le ks va réduire l'évapotranspiration réelle **ETR** (voir équation précédente) et par là modifier le contenu en eau utile du sol.

Ensuite, ce coefficient de stress hydrique va jouer sur la **reprise de croissance**. En effet, en l'absence de stress, le rejet planté va commencer par perdre du poids avant de pouvoir produire de la biomasse lui permettant de dépasser son poids de plantation initial. Cette période a une durée appelée reprise de croissance. On considère que pendant cette période de temps, chaque jour où la plante subit un stress hydrique fort va engendrer un jour de retard sur la reprise de croissance. Ainsi nous calculons une reprise de croissance réelle selon la règle :

$$\text{Reprise de croissance réelle} = \text{reprise de croissance} + \text{nombre de jours de stress fort}$$

De plus, chaque jour où la plante va subir un stress fort pendant cette période de reprise de croissance va engendrer une perte de poids du plant (en pourcentage, voir plus loin le tableau de calibration).

Une fois le temps de reprise de croissance réelle atteint, la plante va se mettre à refaire de la biomasse végétative, et le stress hydrique, via le Ks, va modifier la teneur en eau de la plante ce qui a pour conséquence de moduler la biomasse fraîche produite. Nous avons vu dans les résultats que la teneur en eau variait entre 70 et 88%. Nous avons introduit une variable **TE modif** qui varie entre ces 2 valeurs en fonction du stress hydrique qui lui varie entre 0 et 1 selon l'équation :

$$\mathbf{TE\ modif = teneur\ en\ eau\ max - (teneur\ en\ eau\ max - teneur\ en\ eau\ min) \cdot (1 - stress\ hydrique)}$$

Ensuite, le coefficient de stress hydrique **Ks** va jouer un rôle inhibiteur sur la formation de biomasse sèche du modèle de croissance suivant l'équation suivante :

Eb*PARI*Stress hydrique fort

où PARI est la part de rayonnement incident intercepté par le couvert végétal et Eb l'efficacité biologique d'utilisation du rayonnement capté par la culture.

Nous avons ajouté une variable **Besoin en eau**. Dès que l'eau contenue dans le réservoir en eau utile du sol est plus faible que la RFU, cette variable renseigne sur le volume d'eau à ajouter pour remplir la RU.

$$\text{Besoin en eau} = (\text{RU} - \text{eau_sol}) / 1000 * \text{surface}$$

3. Calibration

Dans un premier temps, nous avons choisi de calibrer le module de bilan hydrique et ses influences sur le modèle de croissance par rapport aux poids obtenus pour l'expérimentation irrigation. Nous avons donc utilisé les courbes de croissances des plants en condition standard de fertilisation maximum (300 U) avec irrigation et sans irrigation. Nous avons enlevé les poids trop éloignés de la moyenne avec la fonction rm.outliers dans R. Les résultats ont montré qu'un maximum de 3 valeurs par date et modalité ont été éliminés par cette fonction. Les poids moyens respectifs étaient alors de 888.3g pour les irrigués et de 591.7g pour les non irrigués. Nous pouvons observer sur la figure 23 les courbes de croissance simulées par le modèle (courbe verte et jaune) ainsi que les poids issus des données expérimentales (points noirs et rouges).

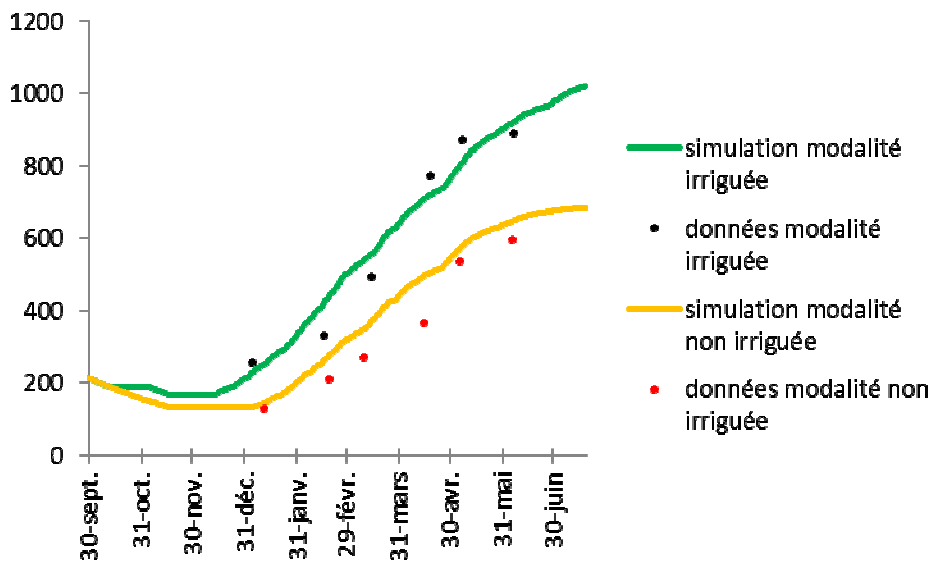


Figure 23 Simulation de l'évolution du poids des plants en grammes au cours du temps pour la modalité irriguée (vert) et non irriguée (jaune) avec les poids issus des données expérimentales en noir (modalité irriguée) et rouge (modalité non irriguée)

Le modèle simule bien l'évolution du poids des plants pour les 2 modalités (irriguée : RMSE=58.2 ; R²= 0.95 et non irriguée : RMSE= 183; R²=0.96). Le temps de reprise de croissance réelle prédit par le modèle pour la condition irriguée est de 96 jours et de 132 jours

pour la modalité non irriguée (contre environ 75j et 140j respectivement déduites pour les données expérimentales, cf. partie III.1). Les valeurs des paramètres utilisés ici sont récapitulées dans le tableau 4.

Tableau 4 Valeurs attribuées aux différents paramètres après calibration du module hydrique sur un premier jeu de données

Θ_{cc}	0.396
Θ_{fp}	0.28
Pourcentage RU pour RFU	50%
Reprise de croissance	50 jours
Seuil stress fort	0.01
Impact maximum du Stress hydrique sur la formation de biomasse	0.9
K_c	0.4
Zr min et max (mm)	50 - 200
Pente de croissance racinaire	0.3

Nous avons ajouté un module permettant de comparer le potentiel du sol à 30cm de profondeur prédit par le modèle à celui enregistré par les cannes tensiométriques. Dans cette partie du modèle, la « **RU cannes** » sera fixe (égale à $(\Theta_{cr} - \Theta_{fp}) * 300$ (mm)) et les sorties d'eau correspondront à l'évapotranspiration de la plante.

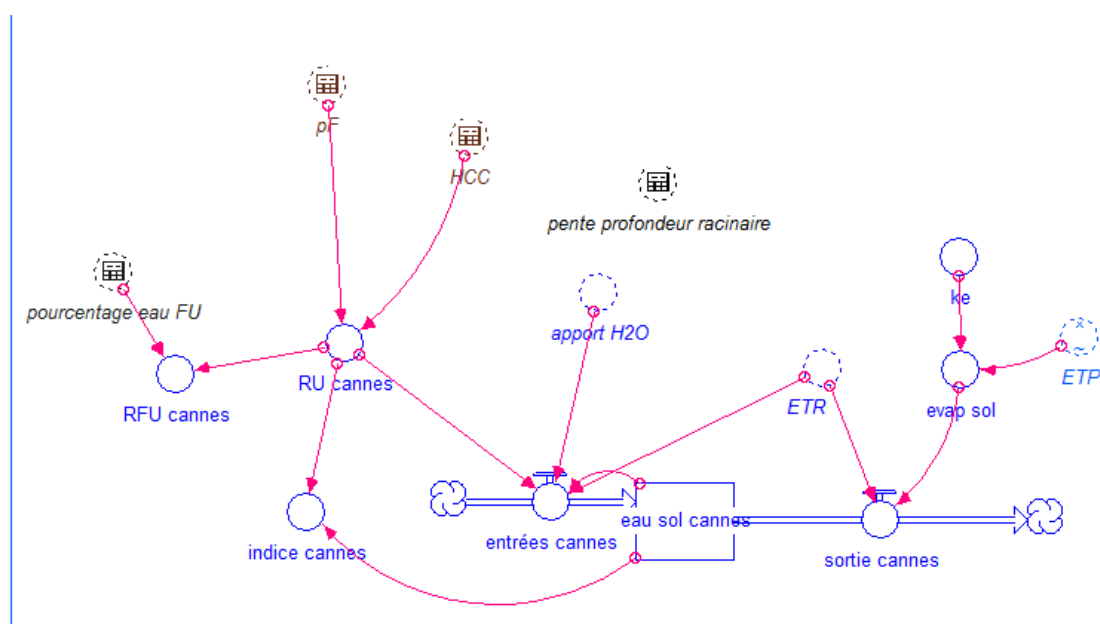


Figure 24 Module permettant de prédire le potentiel hydrique du sol à la profondeur fixe de 30cm correspondant à la profondeur de plantation des cannes en fonction des entrées et sorties d'eau.

J'ai défini ensuite une variable appelée **indice canne** qui varie entre 0 et 1 avec le remplissage de la **RU cannes**. Pour pouvoir comparer la dynamique de cet indice avec les valeurs des potentiels du sol exprimés en pF, je fais varier son inverse entre 0 et 3.3 qui est l'amplitude maximum de sensibilité des cannes. Les valeurs obtenues (égales à : $(1 - \text{indice cannes}) * 3.3$)

sont comparées aux relevés de potentiels du sol obtenus au champ (fig 25 et 26). Nous constatons que le modèle bien paramétré pour prédire la courbe de croissance des plants, simule également logiquement l'évolution du contenu en eau du sol à une profondeur de 30 cm où se situent les cannes tensiométriques.

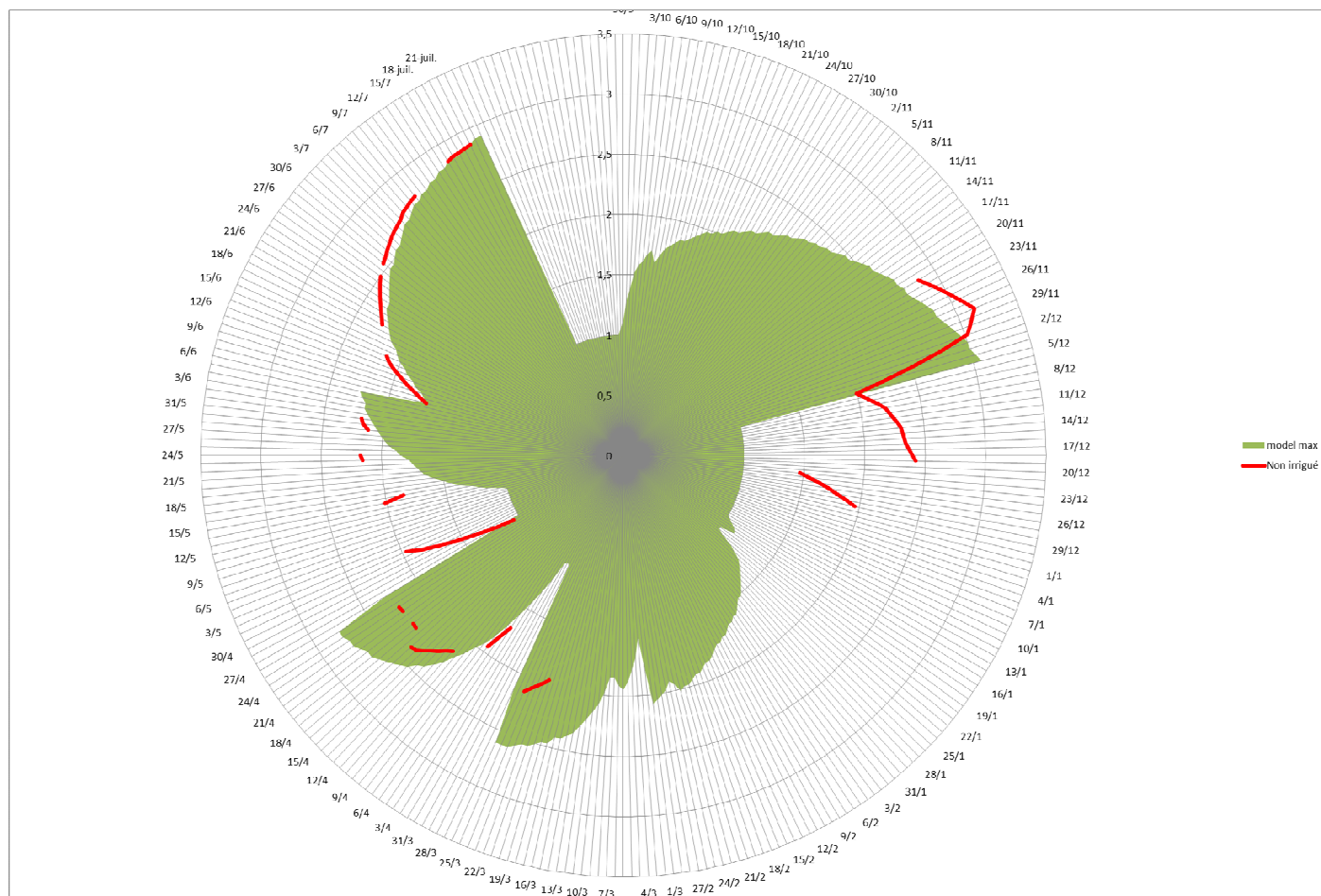


Figure 25 Données issues du relevé des cannes tensiométriques de la modalité non irriguée exprimées en pF (en rouge) et évolution du contenu en eau du sol prédite à 30cm par le modèle (en vert) au cours du temps.

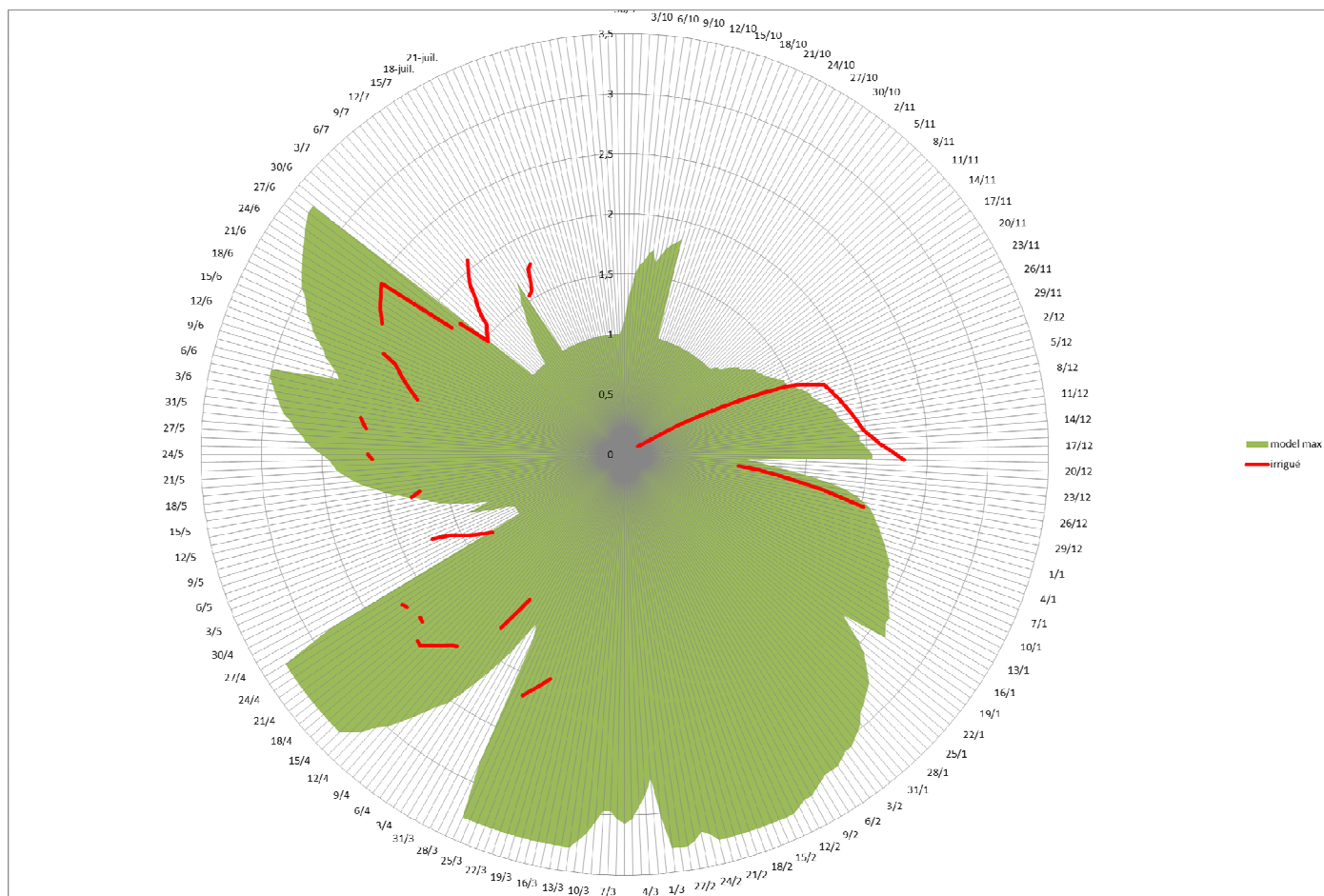


Figure 26 Données issues du relevé des cannes tensiométriques de la modalité irriguée exprimées en pF (en rouge) et évolution du contenu en eau du sol prédite à 30cm par le modèle (en vert) au cours du temps.

V. Discussion

Les essais fertilisation et irrigation nous ont permis de mettre en avant l'effet de la dose de fertilisation et de la quantité d'irrigation sur la croissance et le développement des plants d'ananas Victoria. D'une part, le poids des plants est affecté par le stress hydrique et la dose de fertilisation. D'autre part, le rythme d'émission foliaire est altéré par le stress hydrique fort et la fertilisation.

Un résultat intéressant résultant de la comparaison des différentes doses réside dans le fait qu'une fertilisation augmente bien la croissance des plants mais dans une certaine mesure. En effet, une fertilisation de 300 unités d'azote va augmenter significativement le poids moyen d'un plant par rapport à un plant en condition non fertilisée. Par contre ce poids ne sera pas significativement différent de celui obtenu avec une demi-dose de fertilisation. On peut donc se poser la question de la nécessité d'une telle dose d'azote. Des recherches effectuées à Maurice avaient déjà mis en avant un effet bénéfique plafonné de la fertilisation sur le rendement à une dose plus élevée de 420kg/ha/an (Bhugaloo R. , 1998). Cette différence de dose efficace maximale peut être due à plusieurs facteurs dont l'alimentation hydrique que nous aborderons plus loin (Asoegwu, 1987).

En effet, il est possible que les plants de l'expérimentation fertilisation aient rencontré un stress hydrique au cours de leur cycle végétatif de même que ceux de la modalité non irrigué et irrigué de l'essai irrigation. Ceci est visible au champ par un indicateur externe qui est la teinte jaune rouge que prennent les feuilles en cas de stress hydrique (Malézieux et al., 2003). L'irrigation n'a pu être contrôlée correctement pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la sensibilité des cannes est une limite au suivi précis de l'humidité du sol. N'allant pas au-delà de 2000hPa (pF 3.3), elles ne permettent pas de détecter les stades de teneurs en eau au point de flétrissement temporaire et au point de flétrissement permanent. Le point de flétrissement permanent est établi à un pF de 4.2 soit 16 000hPa, et le point de flétrissement temporaire aux alentours de 10 000hPa avec un pF autour de 4 (Musy & Soutter, 1991). De plus, les cannes ont été plantées trop profondément dans le sol pour permettre de suivre le taux d'humidité réel du sol au niveau de la zone d'exploration racinaire qui de plus n'est pas figée au cours de la croissance. Le sol sous billon doit sécher plus rapidement en surface (0-20cm), lieu de prélèvement d'eau par les plantes, qu'à 30cm. La figure 27 présente les potentiels hydriques détectés par les cannes que nous avons plantées au sein de la culture sous billon aux profondeurs, 15, 20 et 30cm (voir fig.19). Nous constatons que le potentiel du sol à 30cm est effectivement plus faible qu'à 15 ou 20cm.

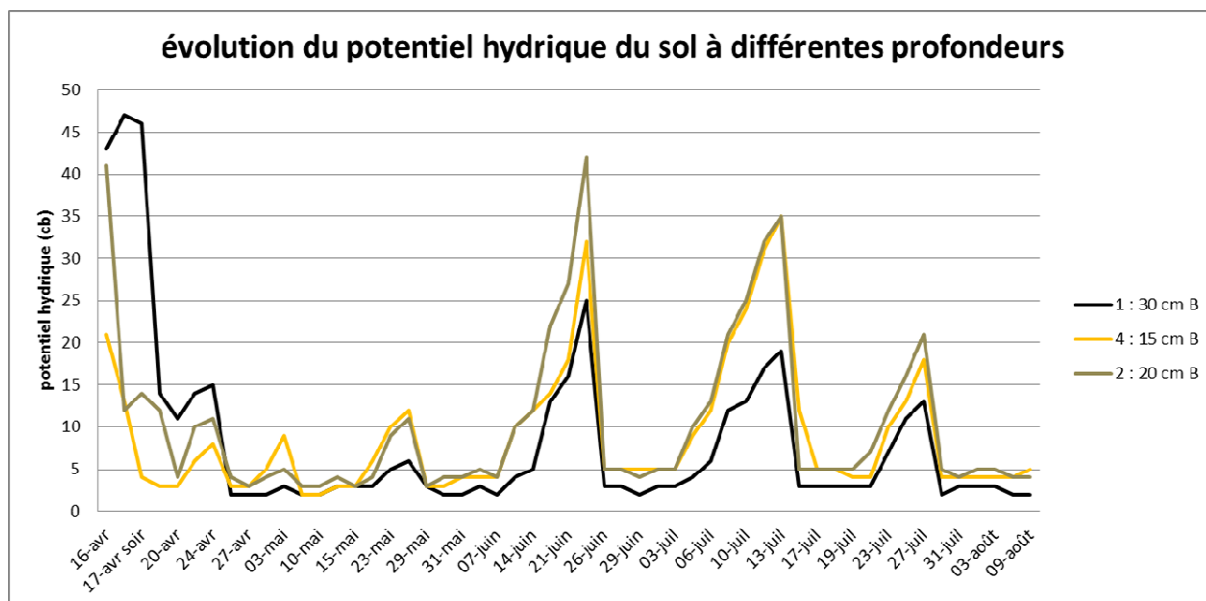


Figure 27 Graphique représentant le potentiel de pression en centibars du sol relevé sous billon à 15cm (jaune), 20cm (marron) ou 30cm (noir).

Ensuite, la courbe de rétention en eau du sol n'est pas connue précisément entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent. La figure 28 rend compte du fait que les courbes de potentiels de pression varient d'une description à l'autre et ne sont pas figées pour un type de sol (Musy & Soutter, 1991) (Duchaufour, Souchier, & Bonneau, 1991). Seules des analyses effectuées par un laboratoire de sol nous permettrait d'obtenir une courbe de potentiel de pression complète pour le sol de notre parcelle.

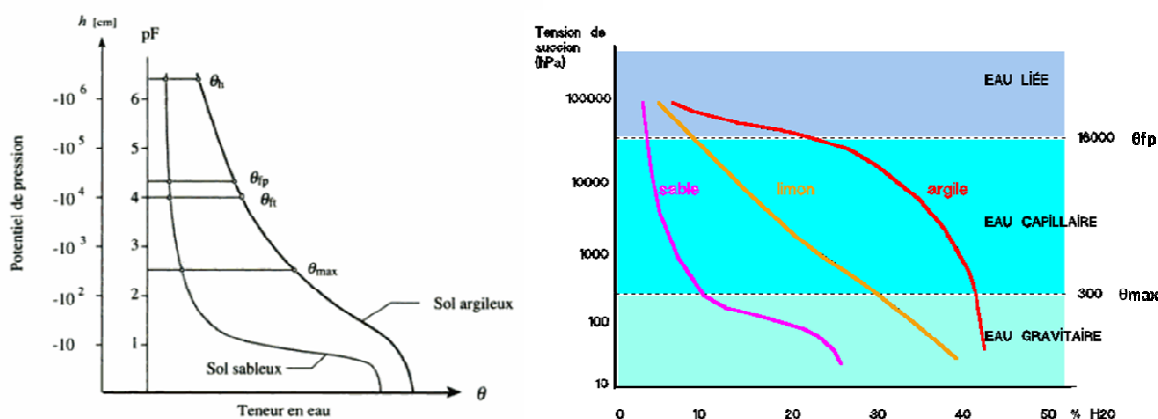


Figure 28 Taux d'humidité remarquables et potentiels énergétiques correspondants. A gauche (Musy & Soutter, 1991), à droite (Duchaufour et al., 1991).

Les résultats obtenus pour la fertilisation doivent donc être examinés avec précaution. En effet, la différence significative de poids observée pour la modalité 300 U par rapport à la modalité 0 U est à mettre en relation avec un taux d'émission foliaire réduite tout au long du cycle végétatif mais également avec une teneur en eau des plants non fertilisés (0 U) qui va être significativement plus basse que celle des plants fertilisés à 300U (fig. 12). Or ces plants

ont reçu exactement les même précipitations et irrigations. La dose d'azote joue donc sur l'alimentation hydrique de la plante.

Les résultats obtenus sur la teneur en eau dans cette expérimentation peuvent nous renseigner sur la contribution de la fertilisation à la résistance au stress hydrique. Avec une croissance plus faible, significative à partir du 5^{ème} mois, les plants n'ayant pas reçu de fertilisation doivent présenter un développement de leur croissance racinaire réduite. Ceci est effectivement vérifié par les résultats montrant une différence significative du poids des racines entre les plants fertilisés et les plants non fertilisés (fig. 10). Ils ne peuvent à priori donc pas puiser l'eau aussi profondément que les plants fertilisés à 300 U, disposent donc d'une réserve en eau utile plus faible et risquent de rencontrer un stress hydrique plus précoce. Pour le Cayenne Lisse, deux périodes d'émissions racinaires sont connues, la première se situe entre 2 à 4 semaines après plantation jusqu'au 2^{ème} mois et la seconde au 4^{ème} mois (PIP, 2009). Il y a bien un pic de croissance de racines commençant autour du JAP 120 pour les plants fertilisés et irrigués, cette augmentation de croissance est cependant moins claire pour les plants non irrigués et non fertilisés dont la croissance racinaire semble perturbée par le stress hydrique et azoté. Ces résultats sont cohérents avec ceux décrits par Kadzimin présentant un nombre et une longueur des racines diminués par le stress hydrique (Kadzimin, 1975).

D'un autre côté, ces plants, ayant émis moins de feuilles (cf partie III.2), ont une réserve hydrique moins élevée pour parer un stress éventuel. Des études ont montré que les plants plus petits vont présenter un arrêt de capture du CO₂ le jour bien plus précoce que de plants de taille supérieure (Zhu 1996). Les conditions de stress dans lesquelles les plants ont poussé ont pu contraindre ces plants à utiliser une partie de la teneur en eau de leurs feuilles. Considéré sous cet aspect, la dose de fertilisation, aurait donc bien un effet sur la croissance des plants d'ananas en interaction avec l'alimentation hydrique. Nous pouvons ainsi observer lors de l'arrachage 4 (autour du 13 avril) une différence de teneur en eau plus marquée pour les différentes doses d'azote alors que les relevés de cannes tensiométriques montrent que le potentiel moyen du sol est relativement élevé (fig. 12). A cette date, il n'y a pas de différence significative du poids sec des plants en fonction de la fertilisation, il y a par contre une différence de teneur en eau engendrant une différence significative du poids frais des plants en fonction de la dose d'azote.

Ces résultats sont cohérents avec ceux décrits par Asoegwu en 1987 qui étudiaient 5 niveaux d'azote avec 4 rythmes d'irrigation. Il a démontré qu'avec une irrigation intermédiaire, les meilleurs rendements étaient obtenus par une fertilisation de 150kg d'azote par hectare, au-delà de cette dose, avec cette irrigation, la fertilisation croissante n'avaient pas d'effets supplémentaire sur le poids final des plants (Asoegwu, 1987).

L'essai irrigation indique clairement une différence de croissance et de développement des plants non irrigués par rapport aux plants irrigués. Ceci peut être décomposé en plusieurs parties.

Tout d'abord, les plants irrigués ont un poids frais et sec significativement plus élevé tout au long du cycle végétatif que les plants non irrigués ayant connus une sécheresse après plantation. Ils présentent également une teneur en eau différente durant toute cette période. Les plants les plus stressés fabriquent donc moins de biomasse sèche mais stockent également proportionnellement moins d'eau.

Nous constatons que les plants stressés émettent moins de feuilles pendant la forte période de sécheresse initiale, ce qui peut expliquer en partie la différence de poids. Une fois la période de sécheresse la plus forte passée (début décembre), les plants atteignent à nouveau un taux d'émission foliaire équivalent à celui des plants irrigués. Etant donné que la différence d'alimentation hydrique entre les deux modalités se situe principalement dans les deux premiers mois suivant la plantation, nous ne pouvons pas savoir précisément si le rythme d'émission foliaire est affectée uniquement au début du cycle car il s'agit de la période critique pour le plant qui initie sa croissance ou si de mêmes résultats auraient pu être observés plus tardivement dans le cycle végétatif. En effet, à la plantation, le système racinaire du plant est encore mal développé l'obligeant à puiser dans ces réserves (pertes de poids initiales). La baisse du rythme d'émission foliaire va ainsi dans le sens d'un décalage dans de la reprise de croissance pour les plants ayant subi un stress hydrique fort dans les mois suivant la plantation. L'expérience doit être répétée afin que les plants d'ananas subissent plus d'une période de sécheresse clairement marquée à différent temps du cycle végétatif afin de déterminer les périodes où le développement est sensible au stress hydrique.

Ensuite, la croissance racinaire est également diminuée par le stress hydrique initial (fig.11) en cohérence avec la littérature (Kadzimin 1975). Ceci peut contribuer à la différence de teneur en eau plus faible des plants non irrigués pendant la période où les deux modalités de l'essai ont reçu les mêmes quantités de précipitations sans irrigation supplémentaire (entre janvier et juin).

En ce qui concerne la modélisation du bilan hydrique, il est important de noter que le modèle, via le module de bilan hydrique, a bien simulé les courbes de croissance des deux modalités de l'essai irrigation (fig. 23). Il a reporté des coefficients de stress différents, non nuls, pour les deux conditions au cours du cycle. Il se base sur la RU et la RFU définies par les paramètres d'entrée du sol (Θ_{cr} et Θ_{fp}) et sur les entrées d'eau pour définir l'eau reçue par les plants et le stress hydrique associé. Il se base également sur le poids du plant qui évolue au cours du temps pour définir la zone d'exploration racinaire. La modélisation des courbes de croissance ne dépend en aucun cas des relevés tensiométriques au champ. Il simule correctement la croissance des plants irrigués et non irrigués. Cependant la calibration est rendue plus difficile qu'elle ne serait avec des plants témoins non stressés. Cela risque également de poser des problèmes au moment de la calibration du stress azoté, s'il y a une interaction avec le stress hydrique. Il sera important de valider le modèle avec d'autres jeux de données. D'autre part, nous ne pouvons pas, à ce stade, déterminer le seuil de déclenchement physiologique du stress engendré par le manque d'eau chez l'ananas. Il faudrait pour le détecter tester l'influence de l'irrigation sur la croissance avec différents taux d'irrigation. Le seuil de déclenchement physiologique du stress est difficile à déterminer étant

donné la capacité de la plante à stocker et puiser l'eau dans ses tissus ainsi que sa capacité d'adaptation à la sécheresse lui permettant de changer son fonctionnement métabolique. Une étude a montré que l'ananas présente, de par ses caractéristiques métaboliques de plante en CAM, un bilan CO₂ positif jusqu'à un pF du sol équivalent au point de flétrissement permanent des autres cultures (Nose et al., 1981).

Un des objectifs du module de bilan hydrique est de pouvoir mimer l'influence de l'état hydrique du sol sur les plants d'ananas Victoria à partir de données climatiques simples à obtenir.

Un pilotage fin de l'irrigation de l'ananas reste complexe également puisque l'importance du réservoir formé par les feuilles en rosette n'est pas déterminé chez l'ananas Victoria (il peut atteindre jusqu'à 50ml pour le Cayenne lisse) et l'importance relative des systèmes racinaires aérien/souterrain est mal connu (Py et al., 1984) et dépend des conditions extérieures. Nous ne savons donc pas encore clairement à quel point les faibles précipitations (seuil de précipitations efficaces) et rosées matinales peuvent contribuer à l'alimentation hydrique d'une culture.

Tous les paramètres ne peuvent être pris en compte et il est important de rester à l'échelle d'une parcelle. Nous avons par exemple utilisé dans notre paramétrage un poids de rejet moyen, or nous savons que le poids du rejet à la plantation a un effet sur la croissance et le développement des plants. Plus un rejet va être petit à la plantation, moins sa croissance sera rapide et plus sa période de croissance sera longue avant d'atteindre un poids suffisant pour la floraison (Bhugaloo, 2001). Les rejets plantés sur notre parcelle pour une même répétition sont homogènes en poids mais différents d'une répétition à l'autre. Ceci est dû à la difficulté d'obtenir un grand nombre de rejet du même poids sur l'île (sur notre parcelle expérimentale, il y a déjà plus de 7000 rejets plantés) et est par là représentatif des conditions en champs rencontrées habituellement.

VI. Conclusion

Le taux d'émission foliaire est diminué par le stress hydrique au moins dans les deux premiers mois suivant la plantation et par l'absence de fertilisation azotée et ce tout au long du cycle végétatif. Les poids moyens de plants au TIF, qui prédiront le rendement à venir, est augmenté par une fertilisation forte (300 U) et diminué par un manque d'eau. Toutefois, Asoegwu montre au Nigéria sur le Smooth Cayenne qu'avec irrigation, le besoin en azote d'une culture peut passer de 200 kg d'N/ha/an à 100 pour un même rendement (Asoegwu, 1987). Avec une irrigation maximum ou diminuée de moitié, une dose d'azote accrue n'a plus d'influence sur le rendement au-delà de 150 U. Par contre, lorsque l'irrigation est insuffisante, le rendement augmente avec la fertilisation au-delà de cette dose. Dans tous les cas et d'autant plus que les plants de nos essais ne semblent pas avoir reçu l'alimentation hydrique optimale,

il serait important de refaire ces expériences avec une irrigation au plus près des besoins réels de la plante afin de déterminer l'apport d'azote optimal nécessaire à la croissance de l'ananas Victoria à La Réunion. Il serait également intéressant d'examiner l'interaction pouvant exister entre l'irrigation et la fertilisation en réalisant une expérimentation avec différents niveaux d'azote soumis à différentes conditions d'alimentation hydrique par la mise en place d'essais supplémentaires.

Le module de bilan hydrique appliqué au modèle de croissance existant a pour l'instant été calibré uniquement pour l'essai irrigation et montre des résultats concluants quant à la prédiction des courbes de croissance des plants en fonction du bilan hydrique. De plus il mime logiquement l'évolution de l'eau du sol observé au champ ce qui indique que les paramètres attribués aux sols sont corrects. Il est primordial pour l'efficacité de ce modèle de bien caractériser son sol en amont puisque cela va déterminer le réservoir en eau utile du sol et par là l'apparition du coefficient de stress hydrique.

Bibliographie

- Allen, R. (2000). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, pp. (1-2), 27-41.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2000). Crop Evapotranspiration. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, p. 56.
- Asoegwu, S. N. (1987). Effect of irrigation and nitrogen on the growth and yield of pineapples (*Ananas comosus*) cv. Smooth Cayenne. *Fruits*, pp. 42 (9), 505-509.
- Bartholomew, D. P., Paull, R. E., & Rohrbach, K. G. (2003). *The Pineapple: Botany, Production and Uses*. CABI publishing.
- Bartholomew, D., & Kadzimin, S. (1977). Pineapple. Dans P. Alvim, & T. Kozlowski, *Ecophysiology of tropical crops* (pp. 113-156). New-York: Academic Press.
- Bhugaloo, R. (1998). *Effect of different levels of nitrogen on yield and quality of pineapple variety Queen Victoria*. Maurice: AMAS.
- Bhugaloo, R. A. (2001). *Crop cycle study in pineapple : preliminary results*. Maurice: AMAS.
- Brunet, C. (2007). *Typologie des pratiques appliquées à l'ananas Victoria à La Réunion. Analyse de leurs déterminismes et de leurs répercussions agronomiques*. Saint-Pierre: CIRAD-FLHOR.
- Carr, M. K. (2012). The water relations and irrigation requirements of pineapple (*Ananas comosus* var. *comosus*): A Review. *Experimental Agriculture*, pp. 1-14.

- Chabalier, P.-F., van de Kerchove, V., & Saint Macary, H. (2006). *Guide de la fertilisation organique à La Réunion*. CIRAD.
- Chapman, K. R., Glennie, J. D., & Paxton, B. (1983). Effect of five watering frequencies on growth and yield of various plant parts of container grown Queensland cayenne pineapples. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Sciences*, pp. vol 40; (1)75-81.
- Collins, J. L. (1960). *The Pineapple: Botany, Production and Uses*.
- Combres, J. (1983). *Bilan énergétique et hydrique de l'Ananas. Utilisation optimale des potentialités climatiques*. IRFA.
- Duchaufour, P., Souchier, B., & Bonneau, M. (1991). *Pédologie*. Paris: Masson.
- Gouache, D. (2005). *Analyse de la variabilité des conditions d'apparition de la maladie des taches noires de l'ananas à La Réunion (et considérations sur la qualité)*. Saint-Pierre: Cirad-Flhor.
- Lacoeuilhe, J. (1973). Ethrel+Uree=Induction florale. *Réunion annuelle IRFA*, p. 84.
- Lacoeuilhe, J. (1978). La fumure N-K de l'ananas en Côte-d'Ivoire. *Fruits*, pp. 33 (5), 341-348.
- Ladet, N. (2011). *Sécheresse et agriculture : réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Rapport de l'expertise scientifique collective réalisée par l'Inra à la demande du ministère de l'Agriculture et de la Pêche*. INRA.
- Malézieux, E. (1988). *Croissance et élaboration du rendement de l'ananas (Ananas comosus L. Merr)*. Montpellier: INA-PG 241p.
- Malézieux, E., Côte, F., & Bartholomew, D. (2003). Crop Environment, Plant Growth and Physiology. Dans D. Bartholomew, R. Paull, & K. Rohrbach, *The Pineapple. Botany, production and uses* (pp. 69-108). CABI publishing.
- Monteith, J. L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, pp. 9 : 747-766.
- Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. PPUR presses polytechniques.
- Nassibou, J. (2007). *Les exploitations productrices d'ananas Victoria à la Réunion : analyses typologiques et comparaisons agro-économiques*. Saint-Pierre: diplôme d'ingénieur d'agroparistech.
- Nightingale, C. T. (1936). The growth status of the pineapple plant. *Pineapple News*, pp. 68-78.

- Nose, A., Miyazato, K., & Murayama, S. (1977). Studies on Matter Production in Pineapple Plant. *Japan. Jour. Crop.Sci*, pp. 46, 580-587.
- Nose, A., Miyazato, K., & Murayama, S. (1981). Studies on matter production in pineapple plants. II. Effects of soil moisture on the gas exchange of pineapple plants. *Japan Journal of Crop Science*, pp. 50, 525-535.
- Py, C. (1959). Etude sur la croissance de l'ananas en Guinée. *Fruits*, pp. 4:3-24.
- Py, C. (1960). Influence de la date de plantation et du poids des rejets sur la croissance des plants d'ananas en Guinée. *Fruits*, pp. 15 (10), 451-453.
- Py, C. (1965). Approches pour combler le déficit en eau, principal facteur limitant de la culture d'ananas en Guinée. *Fruits*, pp. 20, 315-329.
- Py, C., Lacoëuilhe, J., & Teisson, C. (1984). *l'ananas, sa culture, ses produits*. G.-P. Maisonneuve et Larose.
- Py, C., Oury, B., & Ahmada, F. (1957). *La culture d'ananas en Guinée. Manuel du planteur*. Ed. IRFA.
- Raunet, M. (1991). *Le milieu physique et les sols de l'Ile de la Reunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole*. Montpellier: CIRAD.
- Shiroma, M. (1972). Air temperature in Okinawa and vegetative growth of pineapples. *Sciences Bull., College Agric. Univ. of the Ryukyus*, pp. 19, 363-377.
- Sidéris, C., Krauss, B., & Young, H. (1936). Effects of light intensity on the time of fruit harvest, yield and quality pineapple. *Pineapple quarterly*, pp. 6, 56-66.
- Teisson, C. (1979). Le développement du fruit. *Réunion annuelle IRFA*, p. 47.
- Zhu, J. (1996). Physiological responses of pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) to CO₂ enrichment, temperatures and water deficit. *Phd dissertation*. Honolulu, Hawaiï: University of Hawaiï at Manoa.

Annexes

Annexe I Calendrier et doses de fertilisation pour les conditions 150 U et 300 U de l'essai fertilisation	2
Annexe II Extrait des données d'entrée nécessaires au fonctionnement du module de bilan hydrique	3
Annexe III Module de bilan hydrique tel qu'il est construit avec le logiciel Stella.....	4
Annexe IV Représentation du module de stress hydrique par le logiciel Stella.....	5
Annexe V Représentation de l'influence du stress hydrique sur le module de croissance réalisé avec Stella	6
Annexe VI Module de croissance par plant avec intervention de la variable TE modif.....	7
Annexe VII Module permettant de comparer les données issues des relevés des cannes tensiométriques au champ et de celle prédite par le modèle pour une profondeur de sol fixée à 30cm	8
Annexe VIII Exemples de traitement statistique des données avec R.	9

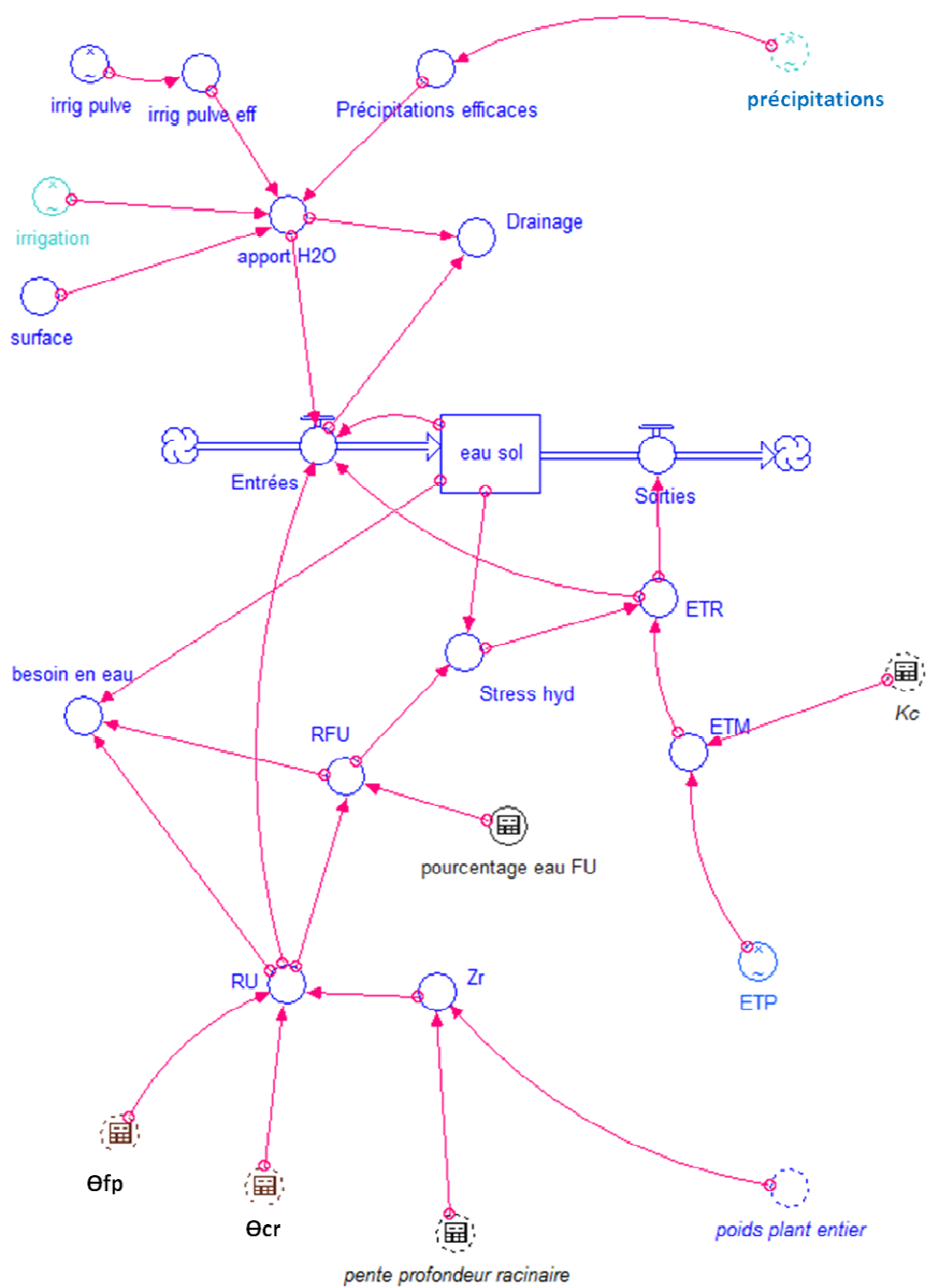
Annexe I Calendrier et doses de fertilisation pour les conditions 150 U et 300 U de l'essai fertilisation

intrant	Intervalle	150 U (dose/ha)	300 U (dose/ha)	Eau	Date réelle
Complet type 18-7-30	0,0	175	350		30/09/2011
Urée	1,6	35	150	3500	09-nov-11
Solupotasse	1,6	70	75	3500	09-nov-11
Urée	2,8	35	150	3500	06-déc-11
Solupotasse	2,8	70	75	3500	06-déc-11
Urée	3,7	35	75	3500	30-déc-11
Solupotasse	3,7	70	150	3500	30-déc-11
Urée	4,6	35	150	3500	11-janv-12
Solupotasse	4,6	70	75	3500	11-janv-12
Urée	5,3	35	75	3500	24-janv-12
Solupotasse	5,3	70	150	3500	24-janv-12
Urée	6,0	35	150	3500	14-févr-12
Solupotasse	6,0	70	75	3500	14-févr-12
Urée	6,4	35	150	3500	28-févr-12
Solupotasse	6,4	70	75	3500	28-févr-12
Urée	7,2	35	75	3500	16-mars-12
Solupotasse	7,2	70	150	3500	16-mars-12

Annexe II Extrait des données d'entrée nécessaires au fonctionnement du module de bilan hydrique

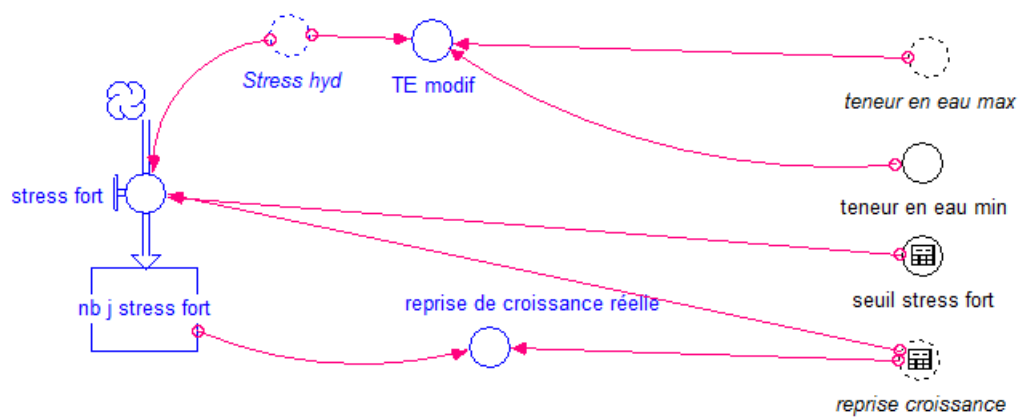
date	précipitation	irrigation	Temp	Rg	ETP
30/09/2011	0	0	21,687	24,23	4,8
01/10/2011	0	0	21,761	17,26	3,6
02/10/2011	0	0	21,686	27,71	5,7
03/10/2011	0	0	22,484	26,87	5,1
04/10/2011	0	0	22,091	18,41	3,3
05/10/2011	0	0	22,702	25,96	4,7
06/10/2011	0	0	22,222	23,05	4,4
07/10/2011	11,8	0	20,097	5,2	1,5
08/10/2011	0,4	0	20,127	26,38	4,8
09/10/2011	0,2	0	20,554	27,14	5,1
10/10/2011	0,2	0	21,094	27,55	5,5
11/10/2011	0	0	20,941	25,25	4,5
12/10/2011	0	9	21,666	17,35	3,5
13/10/2011	0	0	22,298	14,03	3,1
14/10/2011	0	0	21,14	28,38	4,9
15/10/2011	0,4	0	21,742	27,52	5,3
16/10/2011	0	0	21,869	22,19	4,1
17/10/2011	0	0	22,113	27,5	5,1
18/10/2011	0	0	21,794	18,44	3,5
19/10/2011	0	10	23,19	20,22	3,9
20/10/2011	0	0	23,95	27,27	5,3
21/10/2011	0	0	22,77	21,68	3,8
22/10/2011	0	0	22,626	23,97	4,7
23/10/2011	0	0	22,292	15,66	3,4
24/10/2011	0	10	22,556	24,8	4,8
25/10/2011	0	0	23,297	28,87	5,6
26/10/2011	0	0	23,876	22,34	4,5

Annexe III Module de bilan hydrique tel qu'il est construit avec le logiciel Stella.



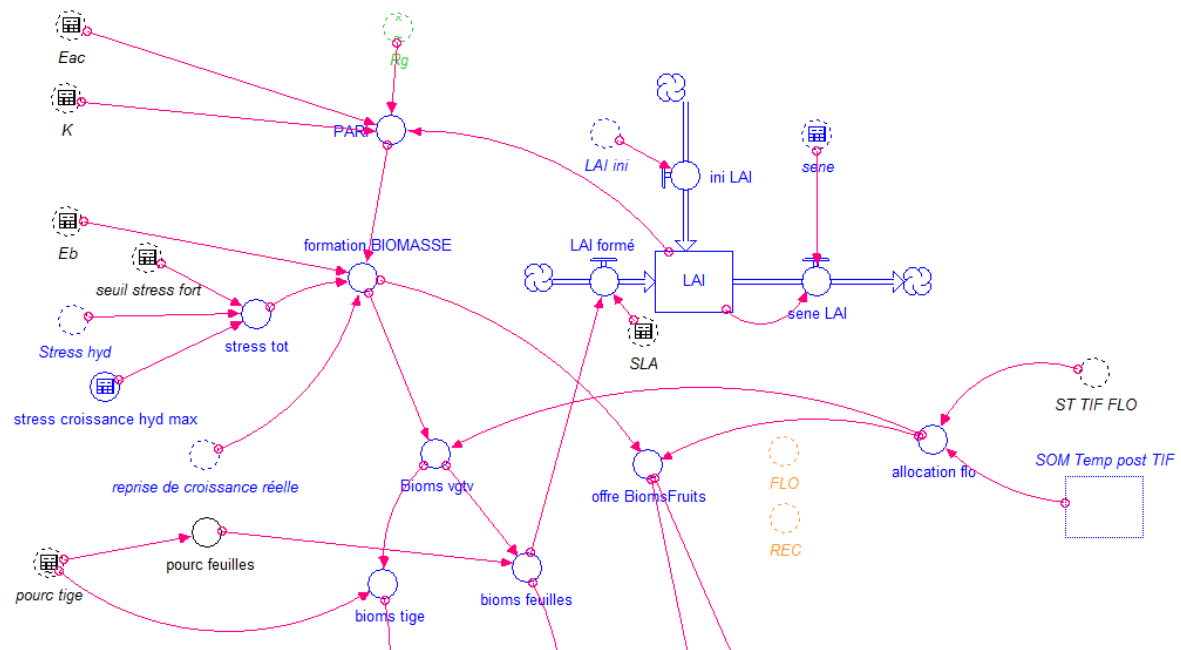
Annexe IV Représentation du module de stress hydrique par le logiciel Stella

Stress

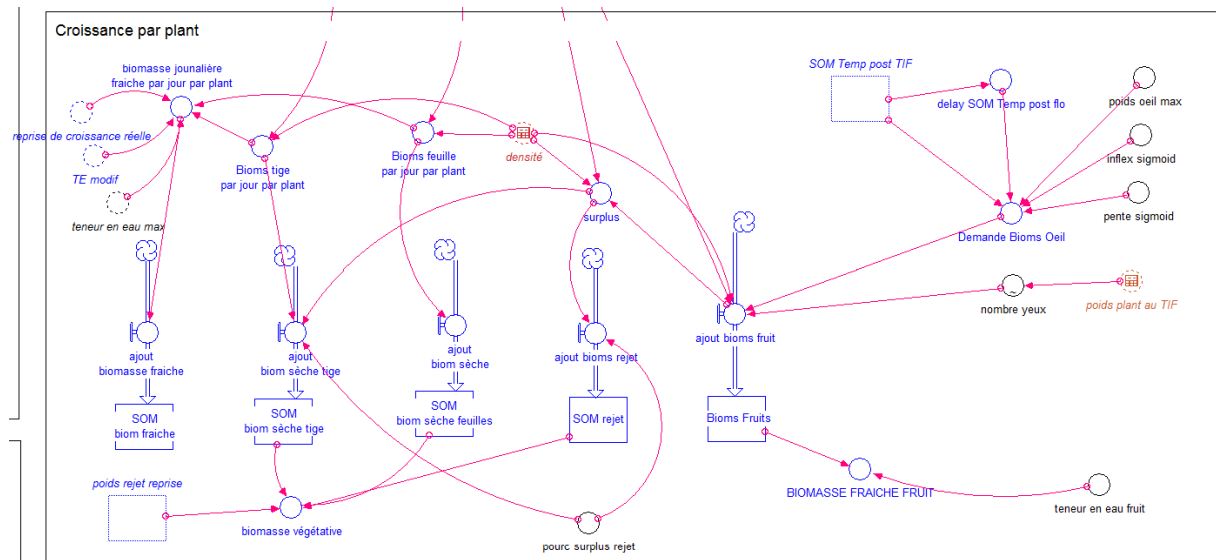


Annexe V Représentation de l'influence du stress hydrique sur le module de croissance réalisé avec Stella

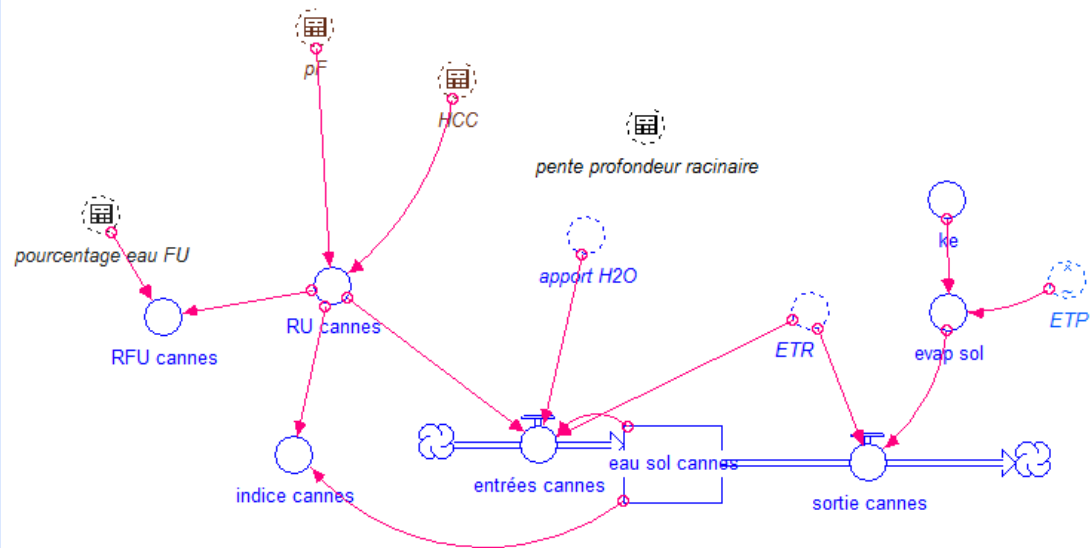
Croissance par m²



Annexe VI Module de croissance par plant avec intervention de la variable TE modif



Annexe VII Module permettant de comparer les données issues des relevés des cannes tensiométriques au champ et de celle prédite par le modèle pour une profondeur de sol fixée à 30cm



Annexe VIII Exemples de traitement statistique des données avec R.

Analyses expérimentation Fertilisation

Test de normalité

```
ks.test(arrachage3b$logPds,"pnorm",mean=mean(arrachage3b$logPds),sd=sqrt(var(arrachage3b$logPds)))
```

One-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: arrachage3b\$logPds

D = 0.0294, p-value = 0.7252

alternative hypothesis: two-sided

Analyse de variance

```
lm1=lm(arrachage3b$logPds~1 + arrachage3b$Ttt + arrachage3b$N.arrachage)
> summary(lm1)
```

Call:

```
lm(formula = arrachage3b$logPds ~ 1 + arrachage3b$Ttt + arrachage3b$N.arrachage)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.82129	-0.11461	0.02603	0.15374	0.46634

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.43430	0.02595	93.810	< 2e-16 ***
arrachage3b\$TttT1	-0.02572	0.02273	-1.132	0.258300
arrachage3b\$TttT2	-0.06303	0.02279	-2.765	0.005880 **
arrachage3b\$N.arrachage2	0.12310	0.03193	3.856	0.000129 ***
arrachage3b\$N.arrachage3	0.30721	0.03202	9.594	< 2e-16 ***
arrachage3b\$N.arrachage4	0.40589	0.03211	12.642	< 2e-16 ***
arrachage3b\$N.arrachage5	0.46617	0.03193	14.599	< 2e-16 ***
arrachage3b\$N.arrachage6	0.57398	0.03220	17.826	< 2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2194 on 547 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.458, Adjusted R-squared: 0.4511

F-statistic: 66.03 on 7 and 547 DF, p-value: < 2.2e-16

```
anova(lm1)
```

Analysis of Variance Table

Response: arrachage3b\$logPds

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
arrachage3b\$Ttt	2	0.4086	0.2043	4.2423	0.01485 *
arrachage3b\$N.arrachage	5	21.8492	4.3698	90.7450	< 2e-16 ***
Residuals	547	26.3409	0.0482		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Test d'égalité des variances

```
bartlett.test(lm1$res~arrachage3b$Ttt)
```

Bartlett test of homogeneity of variances

data: lm1\$res by arrachage3b\$Ttt

Bartlett's K-squared = 4.678, df = 2, p-value = 0.09642

```
bartlett.test(lm1$res~arrachage3b$N.arrachage)
```

Bartlett test of homogeneity of variances

data: lm1\$res by arrachage3b\$N.arrachage

Bartlett's K-squared = 8.2313, df = 5, p-value = 0.1439

Comparaison des moyennes, test de Tukey

```
df=df.residual(aov1)
```

```
MSerror=deviance(aov1)/df
```

```
comparaison=HSD.test(arrachage3b$logPds, arrachage3b$Ttt, df, MSerror, group=TRUE,
main="comparaison des moyennes des différents traitements")
```

Study: comparaison des moyennes des différents traitements

HSD Test for arrachage3b\$logPds

Mean Square Error: 0.04733677

arrachage3b\$Ttt, means

	arrachage3b.logPds	std.err	replication
T0	2.746152	0.02226934	189
T1	2.715980	0.02279048	184
T2	2.679825	0.01992607	182

alpha: 0.05 ; Df Error: 537

Critical Value of Studentized Range: 3.323724

Harmonic Mean of Cell Sizes 184.9535

Honestly Significant Difference: 0.05317323

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	T0	2.746152
ab	T1	2.71598
b	T2	2.679825

Analyses par arrachage

Arrachage 1

Test de normalité

```
ks.test(arrachage3b$logPdsJAP,"pnorm",mean=mean(arrachage3b$logPdsJAP),sd=sqrt(var(arrachage3b$logPdsJAP)))
```

One-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: arrachage3b\$logPdsJAP
D = 0.1252, p-value = 0.0985
alternative hypothesis: two-sided

Analyse de variance

```
lm1=lm(arrachage3b$logPdsJAP~1 + arrachage3b$Ttt + arrachage3b$Billon)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.56641	-0.07148	0.02916	0.10086	0.24297

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.52591	0.03948	13.320	< 2e-16 ***
arrachage3b\$TttT1	0.02767	0.03948	0.701	0.48527
arrachage3b\$TttT2	-0.03000	0.03948	-0.760	0.44933
arrachage3b\$Billon6	-0.07922	0.04559	-1.738	0.08570 .
arrachage3b\$Billon10	-0.27044	0.04559	-5.932	5.47e-08 ***
arrachage3b\$Billon14	-0.14319	0.04559	-3.141	0.00228 **

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1579 on 90 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.3069, Adjusted R-squared: 0.2684

F-statistic: 7.969 on 5 and 90 DF, p-value: 2.968e-06

```
anova(lm1)
```

Analysis of Variance Table

Response: arrachage3b\$logPdsJAP

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
arrachage3b\$Ttt	2	0.05324	0.026619	1.0673	0.3483
arrachage3b\$Billon	3	0.94060	0.313533	12.5708	6.152e-07 ***
Residuals	90	2.24471	0.024941		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Test de l'égalité des variances

```
bartlett.test(lm1$res~arrachage3b$Ttt)
```

Bartlett test of homogeneity of variances

data: lm1\$res by arrachage3b\$Ttt

Bartlett's K-squared = 1.2681, df = 2, p-value = 0.5304

```
bartlett.test(lm1$res~arrachage3b$Billon)
```

Bartlett test of homogeneity of variances

data: lm1\$res by arrachage3b\$Billon

Bartlett's K-squared = 0.5306, df = 3, p-value = 0.9121

Comparaison multiple de moyennes, test de Tukey

```
aov1=aov(arrachage3b$logPdsJAP~arrachage3b$Ttt * arrachage3b$Billon)
summary(aov1)
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
arrachage3b\$Ttt	2	0.0532	0.02662	1.018	0.366
arrachage3b\$Billon	3	0.9406	0.31353	11.988	1.31e-06 ***
arrachage3b\$Ttt:arrachage3b\$Billon	6	0.0479	0.00798	0.305	0.933
Residuals	84	2.1969	0.02615		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```
df=df.residual(aov1)
```

```
MSError=deviance(aov1)/df
```

```
comparaison=HSD.test(arrachage3b$logPdsJAP, arrachage3b$Ttt, df, MSError, group=TRUE, main="comparaison des moyennes")
```

Study: comparaison des moyennes des différents traitements

HSD Test for arrachage3b\$logPdsJAP

Mean Square Error: 0.02615301

arrachage3b\$Ttt, means

arrachage3b.logPdsJAP std.err replication

T0	0.4026966	0.03348792	32
T1	0.4303636	0.03491471	32
T2	0.3726961	0.02950460	32

alpha: 0.05 ; Df Error: 84

Critical Value of Studentized Range: 3.374254

Honestly Significant Difference: 0.09646363

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	T1	0.4303636
a	T0	0.4026966
a	T2	0.3726961

Arrachage 2

Test de normalité

```
ks.test(arrachage3b$logPdsJAP,"pnorm",mean=mean(arrachage3b$logPdsJAP),sd=sqrt(var(arrachage3b$logPdsJAP)))
```

One-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: arrachage3b\$logPdsJAP

D = 0.0674, p-value = 0.7922

alternative hypothesis: two-sided

Analyse de variances

```
lm1=lm(arrachage3b$logPdsJAP~1 + arrachage3b$Ttt + arrachage3b$Billon)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.6233	-0.1013	0.0188	0.1191	0.3668

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	0.54843	0.04551	12.052	< 2e-16 ***
arrachage3b\$TttT1	-0.01123	0.04601	-0.244	0.80782
arrachage3b\$TttT2	0.06871	0.04601	1.493	0.13896
arrachage3b\$Billon6	-0.16805	0.05283	-3.181	0.00204 **
arrachage3b\$Billon10	-0.28575	0.05283	-5.409	5.50e-07 ***
arrachage3b\$Billon14	-0.29707	0.05283	-5.623	2.23e-07 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.181 on 87 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.3407, Adjusted R-squared: 0.3028

F-statistic: 8.992 on 5 and 87 DF, p-value: 6.44e-07

anova(lm1)

Analysis of Variance Table

Response: arrachage3b\$logPdsJAP

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
arrachage3b\$Ttt	2	0.12316	0.06158	1.8793	0.1588
arrachage3b\$Billon	3	1.35001	0.45000	13.7340	2.063e-07 ***
Residuals	87	2.85061	0.03277		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Test de l'égalité des variances

bartlett.test(lm1\$res~arrachage3b\$Ttt)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: lm1\$res by arrachage3b\$Ttt

Bartlett's K-squared = 14.8792, df = 2, p-value = **0.0005875**

bartlett.test(lm1\$res~arrachage3b\$Billon)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: lm1\$res by arrachage3b\$Billon

Bartlett's K-squared = 4.2911, df = 3, p-value = 0.2317

Test de Kruskal non paramétrique

kruskal(arrachage3b\$logPdsJAP, arrachage3b\$Ttt, alpha = 0.05, group=TRUE, main = NULL)

Value: 2.493558

degrees of freedom: 2

Pvalue chisq : 0.2874292

arrachage3b\$Ttt, means of the ranks

arrachage3b.logPdsJAP replication

T0	45.51613	31
T1	42.48387	31
T2	53.00000	31

t-Student: 1.986675

Alpha : 0.05

LSD : 13.58241

Means with the same letter are not significantly different

Groups, Treatments and mean of the ranks

a	T2	53
a	T0	45.51613
a	T1	42.48387



Diplôme : Master 2 Biologie Végétale Intégrative : Gène, Plante, Agrosystème
Spécialité : Systèmes de Productions Végétales Raisonnées
Spécialisation / option : Agrosystème
Enseignant référent : Philippe Leterme

Auteur(s) : Marie Rothé

Organisme d'accueil : CIRAD-PERSYST UPR 26

Adresse : Station Bassin-Plat, 97455 Saint-Pierre

Date de naissance : 15 février 1983

Nb pages : 40 Annexe(s) : 8

Maître de stage : Elodie Dorey, Patrick Fournier

Année de soutenance : 2012

Titre français : Influence de l'irrigation et la fertilisation sur la croissance et le développement végétatifs sur l'ananas Queen Victoria à La Réunion et modélisation du bilan hydrique associé

Titre anglais : Irrigation and fertilization impacts on vegetative growth and development of pineapple Queen Victoria at Reunion Island and water balance model development

Depuis 1988, sous l'impulsion de la demande à l'exportation, l'ananas 'Queen Victoria' s'est fortement développé à la Réunion. C'est la culture fruitière la plus importante de l'île en termes de tonnage exporté (16000 T). La culture d'ananas est fortement artificialisée, elle consomme de fortes doses d'intrants. Son fonctionnement crassulacéen lui permet une bonne adaptation à la sécheresse. Cultivée dans des zones pédoclimatiques variées de l'île, la durée de son cycle de production varie du simple au double, et implique donc d'adapter les pratiques culturales pour garantir un bon rendement et une qualité de fruit quelle que soit la zone de production. Ce travail de stage porte sur l'étude de l'influence de l'irrigation et de la fertilisation sur la croissance et le développement de l'ananas 'Queen Victoria' à la Réunion ainsi que sur l'élaboration d'un module hydrique associé à un modèle de croissance existant. Le poids des plants et des organes ainsi que le rythme d'émission foliaire ont été analysés sous trois modalités de fertilisation (300, 150 et 0 U (kg d'N/ha/an)) et deux modalités d'irrigation (irrigué, non irrigué). Le rythme d'émission foliaire est diminué par un stress hydrique et par l'absence de fertilisation tout au long du cycle végétatif. Le poids moyen des plants lors du traitement d'induction florale (corrélés au poids du fruit à la récolte) est augmenté par une fertilisation forte et diminué par un manque d'eau. Il n'y a pas de différence significative entre les poids des plants des modalités 300 U et 150 U lorsque la plante est bien alimentée en eau. Le module hydrique mime logiquement l'évolution de l'eau du sol observé au champ. Les poids des plants simulés par le modèle de croissance, une fois associé au module hydrique, sont fortement corrélés à ceux observés expérimentalement.

Since 1988, with the increase of exportation's demand, 'Queen Victoria' pineapple has been sharply developed in Reunion island. It represents the most important fruit crop in terms of exported tonnage (16000 T). Pineapple is a highly artificialized crop consuming high levels of inputs. Its crassulacean metabolism allows the plant to adapt well to drought. Cultivated in various pedoclimatic areas of the island, the length of its production can vary from the simple to double and lead to a need of adapting cultural practices to guarantee a good yield and fruit quality whatever the production zone. This work experience aims to firstly studying the impact of irrigation and fertilization on the vegetative growth and development of the Queen Victoria pineapple in Reunion island and secondly to modeling water balance linked to a preexistent growth model. Weights of plants and organs as well as foliar emission rhythm have been analyzed for three levels of fertilization (300, 150 and 0 U (kg of N/ha/year)) and two levels of irrigation (irrigated and no irrigated). Foliar emission rhythm is decreased by water stress and by the absence of fertilization during the whole vegetative cycle. Averaged plant weight at floral induction treatment (correlated with harvested fruit weight) is increased by a high fertilization level and decreased by the lack of water. There is no significant difference between 300 U and 150 U treatments when plants are well watered. The hydric model mimics logically the water dynamic in the soil observed in the field. Plant weights simulated by the growth model when linked with the water module are highly correlated with the experimental ones.

Mots-clés : *Ananas comosus* (L.) Merr, croissance, stress hydrique, fertilisation, bilan hydrique, modélisation

Keywords : *Ananas comosus* (L.) Merr, growth, water stress, fertilization, water balance, model